

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNCE DANELİ ZEMİNLERİN KOMPAKSİYON PARAMETRELERİNİN
İSTATİSTİKSEL ANALİZLER İLE TAHMİN EDİLMESİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
RESÜL SİVRİ

HAZİRAN 2019

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNCE DANELİ ZEMİNLERİN KOMPAKSİYON PARAMETRELERİNİN
İSTATİSTİKSEL ANALİZLER İLE TAHMİN EDİLMESİ



İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Resül SİVRİ

DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL

ZONGULDAK
Haziran 2019

KABUL:

Resül SİVRİ tarafından hazırlanan “İnce Daneli Zeminlerin Kompaksiyon Parametrelerinin İstatistiksel Analizler ile Tahmin Edilmesi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir.
19/06/2019

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk ÇAPAR

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye : Doç. Dr. Utkan MUTMAN

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım./....../2019



Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”


Resül SİVRİ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İNCE DANELİ ZEMİNLERİN KOMPAKSİYON PARAMETRELERİNİN İSTATİSTİKSEL ANALİZLER İLE TAHMİN EDİLMESİ

Resül SİVRİ

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL

Haziran 2019, 103 sayfa

Zeminler, genellikle mühendislik uygulamalarında, arzu edilen kullanım amacındaki kalitede değildir. Bunun için uygun ve ekonomik çözümlerden biri, zeminin stabilize edilmesi ve mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Teorik olarak zemin taneleri ve su sıkışmaz olduğundan zeminin sıkışması boşlukların içerisindeki havanın dışarı çıkması ile oluşur. Bu da danelerin birbirine yaklaşarak daha sıkı bir yapı elde etmeleri ile sağlanır. Danelerin zemin içerisindeki boşlukları doldurarak birbirine doğru hareketleri, zemin tabakasına uygulanan statik veya dinamik yüklerle sağlanır. Tanelerin hareket yeteneği ise uygulanan yük (kompaksiyon enerjisi) ve zeminin su muhtevası ile ilişkilidir. Kompaksiyon, mekanik enerji uygulayarak zeminin yoğunluğunun artırılması esasına dayalı bir stabilizasyon yöntemidir. Bu işlemler sonrasında zemin; daha kararlı bir hale gelir, geçirimsizliği azalır, uygulanan dış yükler altında yeterli dayanıma sahip olur, yapacağı oturmalar azaltılır ve bu özelliklerini çok uzun yıllar koruyabilir. Bu çalışmada bazı özellikleri belli olan bir takım ince daneli zeminin

ÖZET (devam ediyor)

regresyon analizi sonucu, kompaksiyonun etkili parametreleri olan maksimum kuru birim hacim ağırlık ile optimum su muhtevası tahmin edilmeye çalışılmıştır. Yapılan analizler sonucunda birtakım güvenilir denklemler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompaksiyon, kompaksiyon enerjisi, regresyon analizi

Bilim Kodu: 624.01.00



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

PREDICTION OF COMPACTION PARAMETERS OF FINE GRAINED SOIL WITH STATISTICAL ANALYSIS

Resül SİVRİ

**Zonguldak Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Ayşe Bengü SÜNBÜL

June 2019, 103 pages

Soils are generally don't have of the intended quality for engineering applications. One of the appropriate and economical solutions is to stabilize the soil and improve the engineering properties. Theoretically, the soil grains and the water are incompressible, so that the soil compaction occurs when the air inside the gaps comes out. This is ensured by the fact that the grains are closer together and obtain a more tight structure. Movement of grains to each other by filling the gaps is ensured by static or dynamic loads applied to the soil layer. The mobility of the grains is related to the applied load (compaction energy) and the water content of the ground. Compaction is a stabilization method based on increasing the density of the ground by applying mechanical energy. After these processes the ground; becomes more stable, has reduced permeability, has sufficient strength under applied external loads, ground settlement is reduced and ground can retain these properties for many years. In this study, it is tried to predict the optimum water content with the maximum dry unit volume

ABSTRACT (Continued)

weight, which are the effective parameters of the compaction, as a result of regression analysis of a number of fine grained soil. As a result of the analysis, some reliable equations have been obtained.

Key Words: Compaction, compaction energy, regression analysis

Science Code: 624.01.00



TEŞEKKÜR

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırladığım bu çalışmada gösterdiği ilgi, alaka ve yardımlarından dolayı değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL'e ve Araştırma Görevlisi Ömer Güngör'e ve iş arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli eşim ve ağlamalarıyla sürekli destek olan biricik oğlum Hamza SİVRİ'ye şükranlarımı sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 AMAÇ VE KAPSAM	1
BÖLÜM 2 ZEMİNLERDE KOMPAKSİYON	5
2.1 KOMPAKSİYON VE TARİHÇESİ	5
2.2 ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN KOMPAKSİYON İLE DEĞİŞİMİ	7
2.3 KOMPAKSİYON ÜZERİNDE ETKİLİ ZEMİN ÖZELLİKLERİ	7
2.3.1 Su Muhtevası	7
2.3.2 Sıkıştırılacak Zeminin Türü	9
2.3.3 Kompaksiyon Enerji Miktarı	11
2.4 LABORATUVARDA VE ARAZİDE KOMPAKSİYON DENEYLERİ	12
2.4.1 Laboratuvarda Standart ve Modifiye Proctor Deneyleri.....	12
2.4.2 Kompaksiyonun Arazide ve Deneysel Kontrolü	13
2.5 KOMPAKSİYON (SIKIŞTIRMA) ARAÇLARI.....	19
2.5.1 Düz ve Çelik Bandajlı Silindirler.....	19
2.5.2 Keçi Ayaklı ve Küt Ayaklı Silindirler	20
2.5.3 Vibrasyonlu (titreşimli) Kompaksiyon Silindirleri	22
2.5.4 Lastik Tekerlekli Silindirler	22

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.5.5 Darbeli Sıkıştırma Araçları	23
2.6 DONMA DURUMLARINDA KOMPAKSİYON.....	24
2.7 HAVA OLAYLARININ KOMPAKSİYONA ETKİSİ	24
2.8 İNCE DANELİ ZEMİNLERİN KOMPAKSİYONU	25
2.8.1 Killi Zeminlerin Kompaksiyonu	26
2.8.2 Siltli Zeminlerin Kompaksiyonu.....	26
2.9 İRİ DANELİ ZEMİNLERİN KOMPAKSİYONU	27
2.10 KOMPAKSİYON ÜZERİNDE ETKİLİ ZEMİN PARAMETRELERİ	28
2.10.1 Likit Limit	29
2.10.2 Plastik Limit	30
2.10.3 Plastisite İndisi	31
2.10.4 Likidite ve Kıvam İndisleri	32
 BÖLÜM 3 İSTATİSTİKSEL ANALİZLER	 33
3.1 İSTATİKSEL DEĞİŞKENLER	33
3.1.1 Aritmetik Ortalama	33
3.1.2 Medyan (Ortanca)	34
3.1.3 Standart Sapma	34
3.1.4 Kartil	34
3.1.5 Varyans	34
3.2 KORELASYON ANALİZİ	35
3.3 REGRESYON ANALİZİ	36
3.3.1 Basit Lineer Regresyon Analizi	37
3.3.2 Çoklu Lineer Regresyon Analizi	38
3.3.3 Lineer Olmayan Regresyon Analizi.....	39
 BÖLÜM 4 VERİLERİN İSTATİSTİKİ ANALİZİ	 41
4.1 VERİLER VE METODLAR.....	41
4.2 KOMPAKSİYON PARAMETRELERİNİN TAHMİNİ ÜZERİNE LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR	 58

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	61
KAYNAKLAR.....	87
BİBLİYOGRAFYA	91
EK AÇIKLAMALAR A	93
ÖZGEÇMİŞ	103





ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Su muhtevası ile kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişki.....	8
Şekil 2.2 Zeminin artan su içeriği durumlarında kuru birim hacim ağırlığının değişimi.	8
Şekil 2.3 İnce daneli zeminlerde kompaksiyon parametreleri ve doygunluk derecesi ilişkisi... 9	
Şekil 2.4 İri daneli zeminlerde kompaksiyon parametreleri ve doygunluk derecesi ilişkisi....	10
Şekil 2.5 Kompaksiyon deneyinde kullanılan kalıp takımı.....	13
Şekil 2.6 Birim hacim kontrolünde çukur hacmin sırasıyla kum, balon ve yağ doldurma yöntemleriyle ölçümü	14
Şekil 2.7 Nükleer ölçüm aygıtları	15
Şekil 2.8 Plaka yükleme deneyi	17
Şekil 2.9 Drenajsız kayma direncinin su muhtevası ile değişimi.....	18
Şekil 2.10 Düz silindir.....	20
Şekil 2.11 Küt ayaklı silindir.....	21
Şekil 2.12 Keçi ayaklı silindir	21
Şekil 2.13 Vibrasyonlu (titreşimli) silindir	22
Şekil 2.14 Lastik tekerlekli silindir	23
Şekil 2.15 Zemin türlerinin kuru birim hacim ağırlığına etkisi.....	28
Şekil 2.16 Kıvam limitleri ve reolojik anlamı.....	29
Şekil 2.17 Casagrande likit limit ölçüm aleti	30
Şekil 2.18 Plastik limitin koni düşürme deneyi ile bulunması.....	31
Şekil 2.19 Kil minerallerinde likit limit-plastisite indisi arası ilişki	31
Şekil 3.1 x ve y değişkenleri arasındaki doğrusal regresyon.	37
Şekil 4.1 Model 9 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.	45
Şekil 4.2 Model 1 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.	46
Şekil 4.3 Model 4 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.....	46
Şekil 4.4 Model 1 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması. ...	48
Şekil 4.5 Model 2 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması. ...	48
Şekil 4.6 Model 3 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması. ...	49
Şekil 4.7 Model 1 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması. ...	50

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No	Sayfa
Şekil 4.8 Model 2 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması. ...	50
Şekil 4.9 Model 3 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması. ...	51
Şekil 4.10 Model 4 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması. .	51
Şekil 4.11 Model 1 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.	55
Şekil 4.12 Model 5 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.	55
Şekil 4.13 Model 6 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması. .	56
Şekil 4.14 Model 9 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması. .	56
Şekil 4.15 Model 10 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.....	57
Şekil 4.16 Model 11 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.....	57
Şekil 4.17 Model 12 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.....	58
Şekil 5.1 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.	63
Şekil 5.2 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminlerde meydana gelen farklar.	64
Şekil 5.3 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.	65
Şekil 5.4 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminlerde meydana gelen farklar.	65
Şekil 5.5 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.	67
Şekil 5.6 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.	67
Şekil 5.7 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.	68
Şekil 5.8 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.	68
Şekil 5.9 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminlerde meydana gelen farklar.	69
Şekil 5.10 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminlerde meydana gelen farklar.	69
Şekil 5.11 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.	71
Şekil 5.12 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.	71
Şekil 5.13 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminlerinde oluşan farklar.	72
Şekil 5.14 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminlerinde oluşan farklar.	72
Şekil 5.15 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.	74
Şekil 5.16 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminlerinde oluşan farklar.	74
Şekil 5.17 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.	77
Şekil 5.18 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminlerinde oluşan farklar.	77

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No	Sayfa
Şekil 5.19 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.....	78
Şekil 5.20 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminlerinde oluşan farklar.....	78
Şekil 5.21 Literatürdeki denklemlere ve elde edilen modellere ait tahminler.	81
Şekil 5.22 Literatürdeki denklemlere ve elde edilen modellere ait tahminler.	81
Şekil 5.23 Literatürdeki denkleme ve elde edilen modellere ait tahminler.....	83
Şekil 5.24 Literatürdeki denklemlere ve elde edilen modellere ait tahminler.	84
Şekil 5.25 Literatürdeki denkleme ve elde edilen modellere ait tahminler.....	85
Şekil A.1 Model 2 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.....	93
Şekil A.2 Model 3 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.....	94
Şekil A.3 Model 5 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.....	94
Şekil A.4 Model 6 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.....	95
Şekil A.5 Model 7 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.....	95
Şekil A.6 Model 8 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.....	96
Şekil A.7 Model 10 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması...	96
Şekil A.8 Model 4 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması..	97
Şekil A.9 Model 5 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması..	97
Şekil A.10 Model 6 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.	98
Şekil A.11 Model 7 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.	98
Şekil A.12 Model 8 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.	99
Şekil A.13 Model 2 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması...	99
Şekil A.14 Model 3 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.	100
Şekil A.15 Model 4 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.	100
Şekil A.16 Model 7 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.....	101
Şekil A.17 Model 8 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.....	101



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1 Regresyon analizinde kullanılan s. proktor deneyi veri seti	42
Çizelge 4.2 Regresyon analizinde kullanılan (S. Proktor) zeminlerin sınıf ve sayıları.	43
Çizelge 4.3 Zemin numunelerinin (S. Proktor) istatiksel parametreleri.	43
Çizelge 4.4 Regresyon analizi sonucu w_{opt} için tahmin edilen modeller.	44
Çizelge 4.5 Regresyon analizi sonucu γ_{kmax} için tahmin edilen modeller.	47
Çizelge 4.6 Regresyon analizi sonucu γ_{kmax} ile w_{opt} için tahmin edilen modeller.	49
Çizelge 4.7 Regresyon analizinde kullanılan m. proktor deneyi veri seti.....	52
Çizelge 4.8 Regresyon analizinde kullanılan (M.Proktor) zeminlerin sınıf ve sayıları.	53
Çizelge 4.9 Zemin numunelerinin (M.Proktor) istatiksel parametreleri.	53
Çizelge 4.10 Regresyon analizi sonucu w_{opt} ve γ_{kmax} için tahmin edilen modeller.....	54
Çizelge 4.11 Literatürde bulunan önemli denklemler.....	60
Çizelge 5.1 Kompaksiyon parametrelerinin (Standart Proktor) reel değerleri, tahmini değerleri ve oluşan farklar	62
Çizelge 5.2 Kompaksiyon parametrelerinin (Standart Proktor) reel değerleri, tahmini değerleri ve oluşan farklar	63
Çizelge 5.3 Kompaksiyon parametrelerinin (Modifiye Proktor) reel değerleri, tahmini değerleri ve oluşan farklar	64
Çizelge 5.4 Kompaksiyon parametrelerinden w_{opt} cinsinden γ_{kmax} ' a yönelik tahminler.....	66
Çizelge 5.5 Kompaksiyon parametrelerinden w_{opt} cinsinden γ_{kmax} ' a yönelik tahminler.....	66
Çizelge 5.6 Kompaksiyon enerjisi ve w_{opt} cinsinden γ_{kmax} ' a yönelik tahminler.....	70
Çizelge 5.7 Kompaksiyon enerjisi ve w_{opt} cinsinden γ_{kmax} ' a yönelik tahminler.....	70
Çizelge 5.8 Kompaksiyon parametrelerinden w_{opt} cinsinden γ_{kmax} ' a yönelik tahminler.....	73
Çizelge 5.9 Kompaksiyon parametrelerinden w_{opt} 'a yönelik tahminler.	76
Çizelge 5.10 Kompaksiyon parametrelerinden w_{opt} 'a yönelik tahminler.	76
Çizelge 5.11 Tahminlerde kullanılan veri seti[40].....	79
Çizelge 5.12 w_{opt} 'un (S.Proktor) literatürde bulunan denklemler ile tahmini.....	79
Çizelge 5.13 w_{opt} 'un (S.Proktor) elde edilen modeller ile tahmini.	80
Çizelge 5.14 w_{opt} 'un (S.Proktor) elde edilen modeller ile tahmini.	80

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.15 γ_{kmax} 'ın (S.Proktor) literatürde bulunan denklem ile tahmini.	82
Çizelge 5.16 γ_{kmax} 'ın (S.Proktor) elde edilen modeller ile tahmini.	82
Çizelge 5.17 γ_{kmax} 'ın (S.Proktor) elde edilen modeller ile tahmini.	82
Çizelge 5.18 w_{opt} %'un (M.Proktor) literatürde bulunan denklemler ile tahmini.	83
Çizelge 5.19 w_{opt} 'un (M.Proktor) elde edilen modeller ile tahmini.	83
Çizelge 5.20 γ_{kmax} 'ın (M.Proktor) literatürde bulunan denklem ile tahmini.	84
Çizelge 5.21 γ_{kmax} 'ın (M.Proktor) elde edilen modeller ile tahmini.	84



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

w_{opt}	: Optimum su içeriği
γ_{kmax}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık
DOZ	: Doygun olmayan zeminler
F	: Coulomb kayma direnci
c	: Kohezyon
σ_{efek}	: Efektif gerilme
$\emptyset$	: İçsel sürtünme açısı
γ_k	: Kuru birim hacim ağırlık
w	: Su içeriği
Sr	: Doygunluk derecesi
E	: Kompaksiyon enerjisi
γ_n	: Doğal birim hacim ağırlık
CBR	: Kaliforniya Taşıma Oranı
ρ_k	: Kuru birim hacim ağırlık
IL	: Sıvılık indisi
w_L	: Likit limit
w_P	: Plastik limit
I_p	: Plastik limit
KI	: Kıvam indisi
LI	: Likidite indisi
LL	: Likit limit
PI	: Plastisite indisi
PL	: Plastik limit
w_n	: Doğal su içeriği
N	: Veri sayısı
X_A	: Verilerin ortalama değeri
$\bar{x}$	: Aritmetik Ortalama
Q	: Kartil

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

σ	: Standart sapma
σ^2	: Varyans
R	: Korelasyon katsayısı
R^2	: Determinasyon katsayısı
r	: Pearson katsayısı
SH	: Standart hata
USCS	: Birleştirilmiş zemin sınıflandırılması
G	: Çakıl oranı
S	: Kum oranı
ID	: İnce dane oranı
U	: Uniformluluk katsayısı
İM	: İncelik modülü
D_{50}	: % 50'den geçen dane çapı
G_s	: Özgül yoğunluk
C	: Bentonit içeriği
D_{10}	: Efektif çap

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 AMAÇ VE KAPSAM

Günümüzde geoteknik; zemin mekaniği, kaya mekaniği ve temel mühendisliğinin tüm konularını içeren kapsamlı bir mühendislik dalıdır. Geoteknik mühendisliği uygulamalarının tasarımı ve problemlerin çözülmesi için yeterli bir zemin mekaniği ve temel inşaatı bilgisine sahip olmak gereklidir. Mühendis, zeminin projeyi desteklemek için yeterli dayanıma sahip olup olmadığı, mevcut yeraltı suyu durumu ve zeminin türüne göre davranışı gibi konularda bilgili ve haberdar olmalıdır.

Zeminler doğal malzemeler olup, genel olarak kayaların çevre koşulları etkisi altında ayrışması neticesinde meydana gelirler, dolayısıyla özellikleri her zemin sahası için değişkenlik göstermektedir. Bu sebepten her inşaat sahası için zemin özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Zemin özelliklerinin belirlenmesiyle beraber yapmamız gerekenler; uygulamada mukavemet ve mekanik gibi teknik bilgilerimizi kullanarak zemin-yapı etkileşiminin üstünde durmaktır. İstenilen zemin özelliklerine sahip olmayan inşaat sahasının değiştirilmesi veya bu zeminin kaldırılarak yerine uygun zemin yerleştirilmesi teknolojik ve ekonomik nedenlerden dolayı uygun görülmez. Zeminlerde karşılaşılan sıkıntılarda, sahadaki zemin özelliklerinin yerinde iyileştirilmeye çalışılması veya usulüne uygun olarak yerleştirilmiş ve kompakte edilmiş toprak dolgular inşaatı yoluna başvurmak uygundur.

Toprak dolgularda ve doğal zeminlerde kullanılacak zeminlerin malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi ve uygun dolgu hazırlama yöntemlerinden birisi de kompaksiyondur. Kompaksiyon, zemine enerji uygulanarak birim hacim ağırlığının artırılmasına yönelik stabilite yöntemidir. Bunun sonucunda; zeminin geçirimsizliği azalırken, dış etkilere karşı mukavemetinde artma meydana gelir. Oturmalar azalırken zemin çok daha kararlı bir hale bürünür.

Kot yükseltme, toprak dolgu, karayolları ve hava yolları kaplama dolgu, toprak barajlar, su bentleri vb. birçok alanda kompaksiyonla zemin iyileştirme yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır.

Geotekniğin birçok konusunda olduğu gibi insanlar toprak yapıların gerçekleştirilmesi için tarih boyunca sıkıştırma işlemlerini de bilinçsiz de olsa teorinin geliştirilmesinden önce uygulamışlardır. Ancak, bu bilinçsizlik sonucu sıkıştırmaya harcanan kaynağın elde edilen sonuca göre çok fazla olduğu söylenebilmektedir. En basit örnek olarak, arklarda yolun değiştirilmesi amacıyla suyun önüne çekilen seddenin yıkılmaması amacıyla toprağı taşıyan işçilerin toprağı ayakları ile sıkıştırmaları örnek olarak gösterilebilir [1].

Dolguda sağlıklı bir sıkıştırma elde etmek adına kompaksiyonun etkili parametreleri olan optimum su muhtevası (w_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının (γ_{kmax}) bilinmesi gerekmektedir. Kompaksiyon parametreleri arazide belirlenebileceğı gibi, laboratuvar şartlarında Standart ve Modifiye Proktor deneyleri ile de belirlenebilmektedir.

Zeminlerin sıkışmalarında etkili en önemli faktörlerden biri de zemindeki nem miktarı yani zeminin su içeriğidir. Bir zeminin sıkışma durumu genelde kuru birim hacim ağırlığı ile değerlendirilir. Her zemin için belli bir sıkıştırma enerji düzeyinde, su muhtevası ile kuru birim hacim ağırlığı arasında bir ilişki söz konusudur. Birleşik Amerikalı mühendis R.R. Proktor tarafından 1933 yılında ortaya çıkan bu ilişki, her zemin için kuru birim hacim ağırlığının maksimum değere ulaştığı bir optimum su muhtevası değeri olduğunu ortaya koymuştur [2].

İyi bir dolgunun elde edilebilmesi için arazide keçi ayaklı, düz, küt ayaklı, titreşimli silindirler kullanılmaktadır. Bu durumda kompaksiyon, aracın geçiş sayısına, ağırlığına ve geçiş süresi gibi etmenlere bağlıdır. Tez konumuzun söz konusu olduğu; ince daneli zeminlerin kompaksiyonu, kompaksiyon enerjisi, su içeriğı, sıkıştırma türü, kuru birim hacim ağırlık ve zeminin granülometresi gibi parametrelere bağlıdır. Özetle sağlıklı bir kompaksiyon, maksimum kuru birim hacim ağırlığının elde edildiğı optimum su içeriğinin sağlandığı durumda oluşur.

Geçmişte bilim insanları zemine ait parametrelerin belirlenemeyeceği durumlarda, bu özelliklerin tahmin edilmesi yöntemine başvurmuşlardır. Bu tahminlerde genelde korelasyon ve regresyon analizleri kullanmışlardır. Regresyon analizi bir bağımlı değişkenin bağımsız değişkenlerle ifade edilmesini sağlarken, korelasyon analizi de bu ilişkinin doğruluğu ve güvenilirliği adına bilgi vermekte olan istatistiksel yöntemlerdir. Bu tez çalışmasında regresyon analizi yöntemlerinden olan basit ve çoklu lineer regresyon analizleri kullanılmış, bir ve birden fazla bağımsız zemin değişkenlerinin, bağımlı değişkenler olan optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık ile ilişkileri incelenmiştir.

Bu bilgiler doğrultusunda bu tez çalışması, ince daneli zeminlerin kompaksiyonunda etkili parametreler olan optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığın regresyon analizi vasıtasıyla tahmin edilmesini amaçlamıştır. Zemine ait bazı özellikler kullanılarak kompaksiyonun etkili parametrelerin tahminine yönelik farklı modeller oluşturulmuştur.



BÖLÜM 2

ZEMİNLERDE KOMPAKSİYON

2.1 KOMPAKSİYON VE TARİHÇESİ

Sıkıştırma enerjisi uygulanan zemin içindeki havayı azaltmak, zemin danelerinin sıklığını artırmak, zeminin sıklığına göre hacmini azaltmak, dolayısıyla zeminin yoğunluğunu artırmak için yapılan zemin sıkıştırma işlemlerine kompaksiyon denir [3].

Geotekniğin birçok konusunda olduğu gibi insanlar toprak yapıların imalatı için sıkıştırma işlemlerini, bilinçsizde olsa teorinin geliştirilmesinden önce uygulamışlardır. En basit örnek olarak arklarda yolunun değiştirilmesi amacı ile suyun önüne çekilen seddenin yıkılmaması için toprağı taşıyan işçilerin toprağı ayaklarıyla sıkıştırması gösterilebilir. İnşaat mühendisliğinin en eski belgelerinden olan Çin yapı şartnamesinde bina temellerinin inşasından önce zeminin tahta tokmak ve taş ağırlıklarla sıkıştırılması öngörülmüştür. Benzer şekilde Roma İmparatorluğu zamanında da sıkıştırmaya dayalı inşaat çalışmaları yapılmıştır. Söylenti doğru ise kompaksiyonun ne denli etkin olduğu 1906 yılında ziftlenmiş bir yol yüzeyi üzerinden geçen keçi sürüsünün geride bıraktığı etki ile anlaşılmıştır. Öte yandan, sıkıştırmanın etkin olarak gerçekleştirilmesi için aşırı gayretlerin yararsızlığı da Hindistan'da bir dolgunun sıkıştırılması için üzerinden fillerin geçirilmesi örneğinde görülmüştür. Filin en ağır hayvan olmasına karşın dolgu üzerinden önceki ayak izinden geçmeyi tercih ettiğinden keçilerin uyguladığı etkin enerjiyi sağlamamıştır [1].

Çağdaş özellikleriyle kompaksiyon 1920'lerde başlayarak A.B.D.'de baraj ve otoyol inşaatlarındaki uygulamalarla teknik bir terim haline gelmiştir. Günümüzde ulaşım yollarında yapı dolgularında, baraj gövdelerinde, atık alanlarında, akarsu seddelerinde, dayanma yapıları arkasında, zemin ve kaya dolgunun sıkıştırılması uygulaması geotekniğin en yoğun çalışma alanlarından biri olarak nitelendirilebilir [1].

Zeminlerin sıkıştırılabilirliğinin genel olarak dane dağılımı, kıvam limitleri, boşluk suyunun kimyasal özellikleri ve ortam sıcaklığından etkilendiği bulunmuştur. Zeminin sıkıştırılması ile sıkışması arasındaki farkı açıklamak yararlı olacaktır. Konsolidasyon da doymuş bir zeminin aldığı gerilme artışı sonucu beliren fazla boşluk suyu basıncının sönmülmesi nedeniyle hacim azalması göstermekte, bu da suyun dışarıya atılması ile gerçekleşmektedir. Kompaksiyonda doymuş olmayan zeminin su muhtevası sıkıştırma işlemini gerçekleştirenin kontrolü altında tutulurken standart bir enerji uygulaması yapılmakta ve kuru birim hacim ağırlık yükseltilmektedir. Diğer açıdan her iki durumda kuru birim hacim ağırlığın yükselmesi ile son bulmakta ise de, olayın mekaniğinde büyük fark olduğu unutulmamalıdır. En önemli farkın konsolidasyonun doymuş, sıkıştırmanın DOZ ortamında gerçekleştiği söylenebilir [1].

Zeminlerde yapılan dolguların genel amacı: yapı ve yol kısımlarında yüzey düzgünlüğünü, baraj gibi su yapıları için stabilitesini artırmaktır. Bu gibi durumlarda zeminin stabilitesini ve oturma durumunu, ilgili zeminin kalınlığı ve sıkışabilirliği belirler [4].

Zeminin kompaksiyon sonucu yoğunluğu artar, dolayısıyla istenen özelliklere daha yakın bir durum elde edilmektedir. Daha iyi bir kompaksiyon için zemin danelerinin durgun ve hareketli yükler altında hareket edebilmesine olanak sağlanmalıdır. Bu hareketler, uygulanan kompaksiyon enerjisi ve zemin su içeriğine göre değişebilir. Zeminin sahip olduğu su içeriği doymuşluk seviyesine yakın değerlerde ise yeterli kompaksiyonun yapılması zorlaşır. Zeminin su muhtevası büyüdükçe zemine ait havanın kompaksiyon sonucu azalması yavaşlar. Zeminin suya tamamen doymuş olduğu durumlarda, kompaksiyon esnasında boşluk suyu basınçları artarak, zemin danelerinin hidrostatik basınç sebebiyle, daha iyi kompakte olmasını engelleyecektir. Zeminin w_{opt} değerinden daha fazla miktarda su muhtevasına sahip olduğu durumlarda, zemin danelerinin sürtünme olasılıkları azalır, kapiler gerilme değerleri düşer, daneler arasında elektriksel itme kuvvetleri oluşur. Bu durumun tersi söz konusu olduğunda, sürtünmeler ve kapiler gerilmeler artar, itme kuvvetleri çekme kuvvetlerine dönüşür. Her iki farklı durum ele alındığında, iyi bir sıkışmanın (kompaksiyon) sağlanabilmesi adına zeminde, gereğinden az ve/veya fazla su bulunması durumları sağlıklı sonuç vermediğinden, zemin su değerinin optimal bir değere sahip olması gerektiği anlaşılmıştır. Bu değere kompaksiyonun etkili parametrelerinden olan w_{opt} (optimum su muhtevası) denir. Bu değer zemin cinslerine ve türlerine göre değişmekle beraber, uygulanan sıkıştırma türü ve enerjisine göre değişmektedir [5].

2.2 ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN KOMPAKSİYON İLE DEĞİŞİMİ

Kısaca kompaksiyon: zemin boşluklarının azaltılarak, danelerin birbirine yaklaşp daha stabil hal alması amacıyla yapılan sıkıştırma işlemidir. Alt yapı işlerinde kompaksiyon sonucu, kayma mukavemetinde ve taşıma gücünde yeterlilik, düşük geçirimlilik ve minimum su emme ve tekrarlı yükler altında minimum deformasyon gibi kriterlerin sağlanması beklenir.

Zemin danelerini birbirine yaklaştıran kompaksiyon sonucu sürtünme mukavemeti artar. Özellikle ince daneli zeminlerde kohezyon (çekim) kuvvetinin artmasına neden olur. Coulomb kayma direncin formülünü inceleyecek olursak:

$$F=c+\sigma_{efek} \cdot \tan(\phi) \quad (2.1)$$

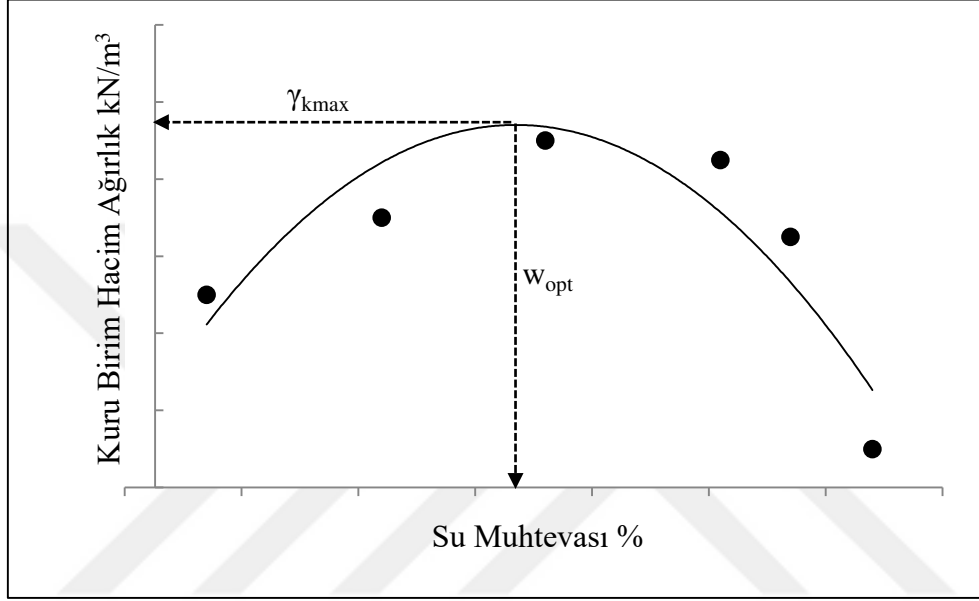
Burada c kohezyon, σ_{efek} efektif gerilme, ϕ içsel sürtünme açısını ifade etmektedir. Zemine uygulanan kompaksiyon sonucu boşluk suyu oranı düşmekte dolayısıyla efektif gerilme artmaktadır. Su muhtevasının düşmesi sonucu kohezyon ve içsel sürtünme açısı artacak, bununla birlikte kayma direnci kuvveti ve zeminin taşıma gücünde artacaktır. Zeminin boşluk oranının az olması sıklığının dolayısıyla geçirgenliğinin düşük olması anlamına gelmektedir. Bu durum aynı zamanda geçirgenlik (permeabilite) katsayısının düşük olması, kılcallığında artabileceği anlamına gelmektedir. Bu durumlarda kılcallığın meydana getirebileceği olumsuz durumları yeraltı su seviyesini düşürerek gidermek gerekebilir. Zemine uygulanan sıkıştırmanın yük ve enerji değerleri büyüdükçe, ondan sonra uygulanan kompaksiyon işlemleri sonucu meydana gelen deformelerde o kadar küçülecektir [6].

2.3 KOMPAKSİYON ÜZERİNDE ETKİLİ ZEMİN ÖZELLİKLERİ

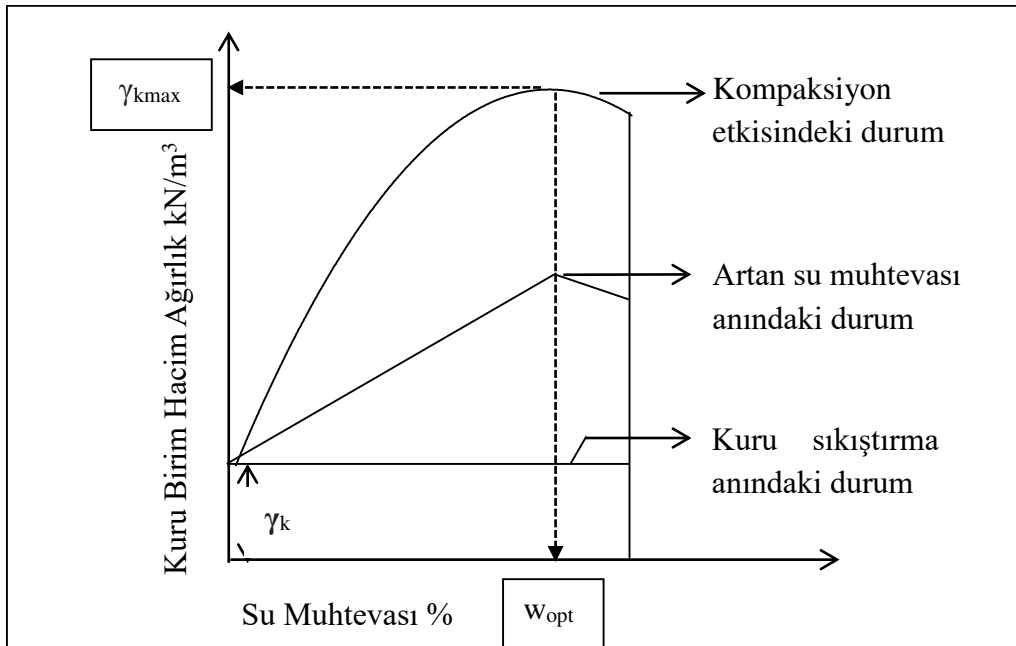
2.3.1 Su Muhtevası

Sıkıştırma kaynaklı kuru yoğunlukta oluşan artış, zemine ait su muhtevası ve uygulanan enerji miktarıyla ilintilidir. Etkili bir kompaksiyon için istenen durum olan, kuru birim hacim ağırlığı azami yapan bir optimum su muhtevası vardır [7]. İki parametrenin grafiksel ilişkisi Şekil 2.1 de gösterilmiştir. Zeminin su muhtevasının artması durumunda, kuru birim hacim ağırlık bir süre artıp, pik değer (maksimum) yaptıktan sonra azalmaktadır. Kuru birim hacim ağırlığın maksimum değer eriştiği durum, zemin içerisindeki boşlukların doymun hale geldiği

durumdur. İstisnai bir durum olarak kohezyonlu zeminler minimal seviyede de olsa aynı durumda hava boşluğuna sahiptirler. Maksimum değerdeki kuru birim hacim ağırlık, artan su içeriği ile zemin daneleri arasında itki meydana getirmektedir. Suyun birim ağırlığının zemine göre daha az olmasından mütevellit, mevcut su hacmi de arttığından zeminin birim ağırlığı azalmaktadır. Dolayısıyla su muhtevasının optimal seviyeden daha fazla değer aldığı durumlar kuru birim hacim ağırlığın azalmasına sebep olmaktadır.



Şekil 2.1 Su muhtevası ile kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişki.

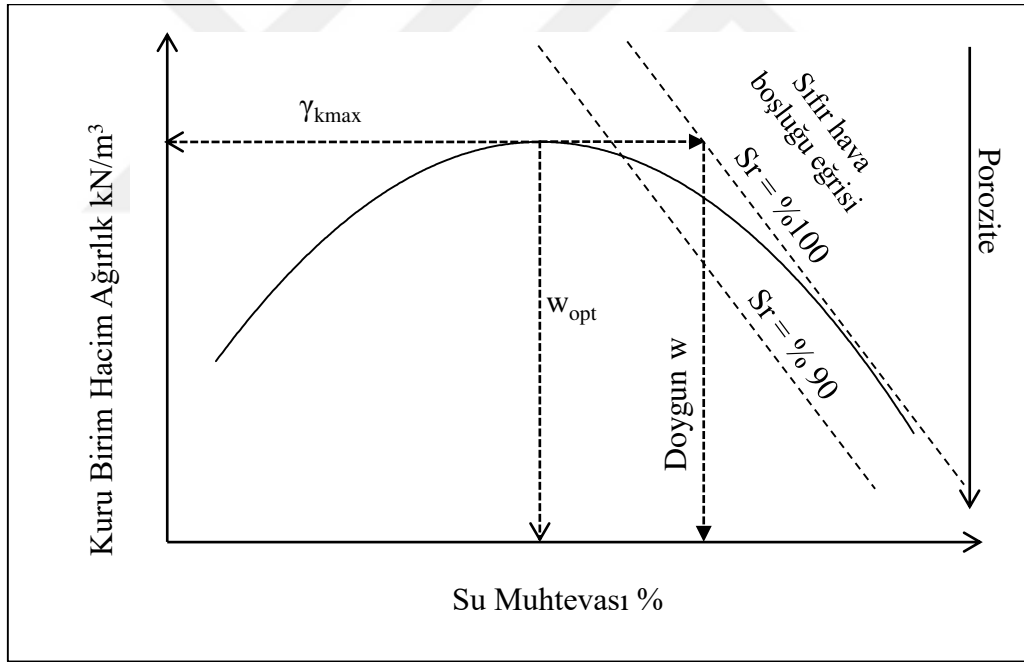


Şekil 2.2 Zeminin artan su içeriği durumlarında kuru birim hacim ağırlığın değişimi.

Şekil 2.2’den de görüldüğü üzere γ_k sabit bir değerdir. Zeminin su muhtevasının sıfır olduğu durumda aynı kompaksiyon enerjisi uygulandığında kuru birim hacim ağırlık değişmemektedir. Zeminin su içeriği zamanla arttıkça, γ_k ’da bu artışa doğru orantılı olarak artış görülmektedir. Bu artış optimum su muhtevası dediğimiz noktadan itibaren boşlukların büyük çoğunluğunun suyla dolmasından dolayı zemin danelerinde oluşan itmeden kaynaklı hacim artışı gerçekleştirecektir. Suyun özgül yoğunluğunun zemine göre daha küçük olmasından mütevellit bu hacim artışı γ_k ’nın azalmasına neden olacaktır.

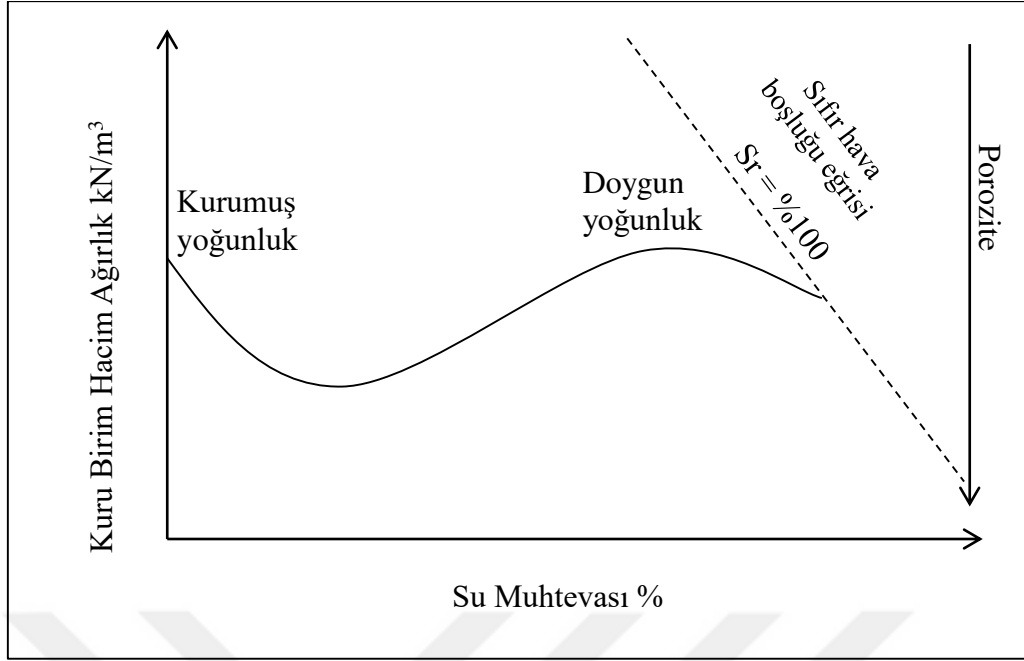
2.3.2 Sıkıştırılacak Zeminin Türü

Kompaksiyona etki eden en önemli özelliklerden biride sıkıştırılacak zeminin türüdür. İnce daneli ve iri daneli zeminler için su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık ilişkisi Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’de verilmiştir.



Şekil 2.3 İnce daneli zeminlerde kompaksiyon parametreleri ve doymuluk derecesi ilişkisi.

Uygulamada hava boşluğunun sıfır olduğu durumlarda kompaksiyon yapılamaz. Ancak birim hacim ağırlığın maksimum değeri aldığı durumlarda boşlukların su olduğu düşünülerek işlemler yapılır. İnce daneli zeminlerin kuru birim hacim ağırlığı iri daneli zeminlere göre daha küçük değerlerde iken boşluk oranları daha büyük değerlerdedir. Bu nedenledir ki ince daneli zeminler iri daneli zeminlere göre daha fazla kompakte olurlar.



Şekil 2.4 İri daneli zeminlerde kompaksiyon parametreleri ve doyumunluk derecesi ilişkisi.

İri daneli zeminler kompaksiyon esnasında basit bir şekilde drene oldukları için boşluk suyu basınçları söz konusu olmaz. Su muhtevasının az olduğu kompaksiyon işlemleri sırasında daneler arasındaki sürtünme kaynaklı itki kuvvetleri meydana gelir. Bu kuvvetlerde kompaksiyona engel olacak şekilde kompakte olmadan hareket ederler. Su muhtevası arttıkça, sıkışmaya karşı gösterdikleri tepki kuvvetleri artar. Bu durumda zeminin kuru birim hacim ağırlıkları düşer. Zeminin su muhtevası değeri büyüdükçe kapiler kuvvetler azaldığından γ_{kmax} artar. İri daneli zeminlerde maksimum kuru birim hacim ağırlık su içeriğinin optimum olduğu değerde elde edilir. Bu durumda zemin doyumunluğa erişmiştir. Su içeriği daha fazla artırıldığında su zamanla drene olacağından kuru birim ağırlıkta azalır. Şekil 2.4’de iri daneli zeminler için aynı kuru birim hacim ağırlık için iki farklı su muhtevası değeri var. Aynı γ_k ’da, optimal w değerindeki boşluk oranı, doyumun haldeki w değerine göre daha fazladır. Özetle w_{opt} değeri kuru birim hacim ağırlığı maksimum yapan değerdir.

Zemin numunesinin içerdiği ince dane oranı yükseldikçe, özkütlesi, kompaksiyon uygulayabilme kolaylığı, geçirimsizliği, boşluk oranı gibi bazı özelliklerinde değişimler meydana gelir. İnce dane miktarı az olan zeminlerde daneler arası temas orta-iyi seviyede iken geçirgenliği fazladır. Yüksek stabil olmakla beraber zor sıkışır ve su ile etkilenmez. Boşlukların dolacağı kadar ince dane içeren zeminlerde şekil değiştirmeye karşı oluşan direnç tanelerin teması ile artar. Orta derecede sıkışabilen bu tür zeminler sudan çok az etkilenirler.

Fazla oranda ince dane içeren zeminlerde daneler arası temas minimal seviyede iken, kolay sıkışabilirler. Geçirgen olmamakla beraber sudan fazlasıyla etkilenirler.

İnce daneli zeminler, w_{opt} değerinden daha fazla su ihtiva ettiğinde plastik ve yapışkan hal alır. Su muhtevasının w_{opt} değerinin altında olduğu durumlarda zeminin tepki kuvveti artar ve kompaksiyon zor hale gelir [8].

Zemindeki boşluk oranı değeri yükseldikçe kuru birim hacim ağırlık değeri düşer. Dolayısıyla ince daneli zeminlerin boşluk oranı iri daneli zeminlere oranla daha fazla olduğundan kuru birim hacim ağırlık değeri ince daneli zeminlerde daha küçük olacaktır. Zemin numunesinin içerdiği ince dane oranı yükseldikçe maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri düşecektir. İnce daneli zeminlerin kompaksiyonu likid ve plastik limit değerleri ile ilintili olup, bu değerlerin artması kuru birim hacim ağırlığı azaltacaktır[8].İnce daneli zeminler plastik limitten daha az w değerinde kompakte edilirse zamanla doygun hale gelen zeminin taşıma gücünde azalma meydana gelebilmektedir. Genel olarak doygun w değeri plastik limitten daha çok likid limite daha yakın değerde ise uygulanan kompaksiyon yetersiz anlamına gelmektedir [3].

Kompaksiyon(sıkıştırma) uygulaması zemine ait danelerin boyutları ve şekli ile ilintilidir. Her boyutta zemin daneleri içeren, iyi derecelenmiş numuneler daha kolay kompakte edilirken, pürüzlü yüzeyle zeminlerde sıkıştırma işlemlerinde zorluk çıkarabilmektedir.

2.3.3 Kompaksiyon Enerji Miktarı

Zemine uygulanan kompaksiyon enerjisinin miktarındaki artış γ_{kmax} 'da artışa neden olurken, w_{opt} 'da azalışa neden olur [7]. Arazide makinalarla yapılan sıkıştırmalarda kompaksiyon enerjisi aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır [9].

$$E = n.Z / (a.h) \quad (2.2)$$

Eşitlikte parametreler sırasıyla; kompaksiyon enerjisi (kgm/m^3), aracın zemin üzerinden geçiş sayısı, iş miktarı ($kg m$), 1 m lik uzunluğa düşen alan miktarı (m^2), kompaksiyon uygulanan zeminin kalınlığını (h) ifade etmektedir [9].

Zemine ait hava boşluğunun az olduğu, w_{opt} değerinin üzerindeki su muhtevası değerlerinde uygulanan enerjinin miktarındaki artış, kuru birim hacim ağırlıkta az miktar değişime yol açar. Tam tersi durumda hava boşluğunun daha fazla olduğu, su muhtevaların w_{opt} değerinden daha düşük olduğu durumlarda, uygulanan enerjideki artışın etkisi fazla olur [7].

Zeminin su muhtevası yükseldikçe uygulanan kompaksiyon enerjisinin zeminin yoğunluğu üzerine etkisi azalır. Yani düşük enerji değerlerinde maksimum yoğunluk için fazla miktarda su içeriğine gerek duyulur.

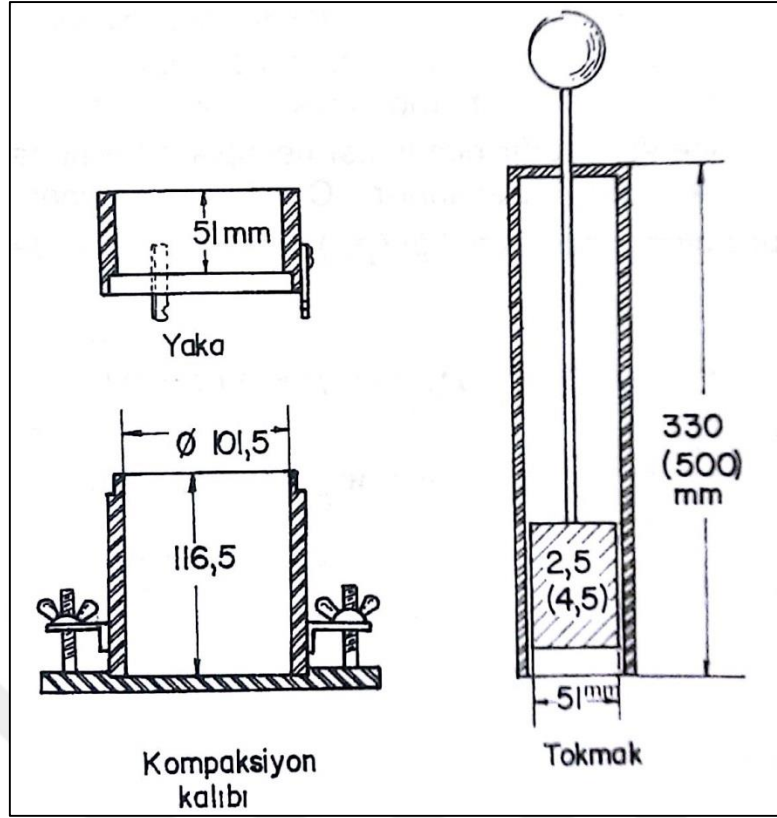
2.4 LABORATUVARDA VE ARAZİDE KOMPAKSİYON DENEYLERİ

2.4.1 Laboratuvarda Standart ve Modifiye Proctor Deneyleri

Zemine ait kuru birim hacim ağırlık, laboratuvarda proktor deneyleri ile bulunur. Bu deney standart (normal) ve modifiye (geliştirilmiş) proktor deneyi olmak üzere iki çeşittir [2].

En yaygın kullanılan standart proktor deneyinde, zemin 940 cm³ lük çelik silindirik kap içinde 3 tabaka halinde ve 2,4 kg ağırlıklı kompaksiyon tokmağının 30,5 cm yükseklikten her tabakaya 25 kez düşürülmesi ile sıkıştırılır. Sıkıştırılan zemin numunesinin hacmi, ağırlığı ve numuneden alınan küçük bir parçanın kurutulması ile elde edilen su içeriği yardımıyla kuru birim hacim ağırlık bulunur. Bu işlemler farklı su içeriklerindeki zemin numuneleri üzerinde uygulanarak proktor eğrisi çizilir. Bu eğriden de kompaksiyonun etkili parametreleri olan w_{opt} ve γ_{kmax} bulunur [2].

Modifiye proktor deneyi ise daha çok havaalanlarında kullanılır. Standart proktor deneyinden farkı daha fazla sıkıştırma enerjisiyle uygulanmasıdır[2]. Deneyde zemin 5 tabaka halinde ve 4,53 kg'lık tokmağın 45,7 cm den her tabakaya 25 defa düşürülmesi suretiyle sıkıştırılır. Fakat her iki deneyde de %20'den daha fazla malzeme 9,5 mm elekte kalıyor ve %30 ve daha az malzeme 20 mm' lik elekte kalıyor ise kap çapı 152,4 mm, boyu 115,5 mm ve vuruş sayısı da 56 olur(TS1900-1).



Şekil 2.5 Kompaksiyon deneyinde kullanılan kalıp takımı [1].

Deneylerde 1 m³ hacmi sıkıştırmak için harcanan enerjinin birimi kg m/m³ olup formülü aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$E = n.h.p / V \quad (2.3)$$

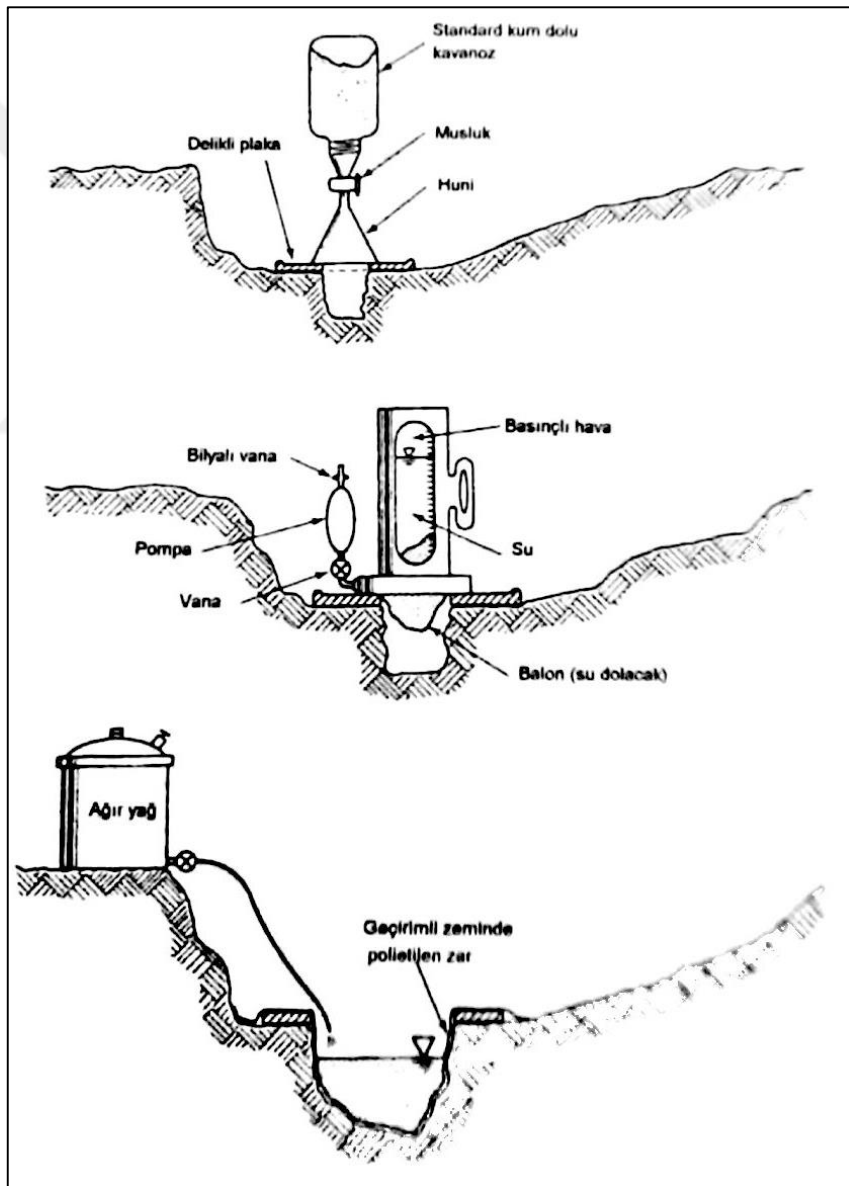
Burada n darbe sayısını, h tokmağın düşme yüksekliğini, p tokmağın ağırlığını, V sıkıştırılan zemin numunesinin hacmini ifade etmektedir [2].

2.4.2 Kompaksiyonun Arazide ve Deneyisel Kontrolü

Geoteknik mühendisliğinin en önemli görevlerinden biride arazide yapılmış kompaksiyon işlemlerinin laboratuvar koşullarında elde edilerek şartnameye konulmuş kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasında gerçekleştirildiğinin kontrolüdür. Bu kontroller tarihsel gelişim içerisinde açılan çukura yağ ve kum doldurma hatta nükleere değişen deneylerle yapılagelmiştir. Denetim önceleri sadece γ_n , γ_k , w_{opt} için yapılırken sonraları zeminin mekanik

özelliklerinde sıkıştırma çalışmaları sonrasında, ölçümün önem taşıması nedeniyle bu tür ölçümlerde kapsamına almıştır [1].

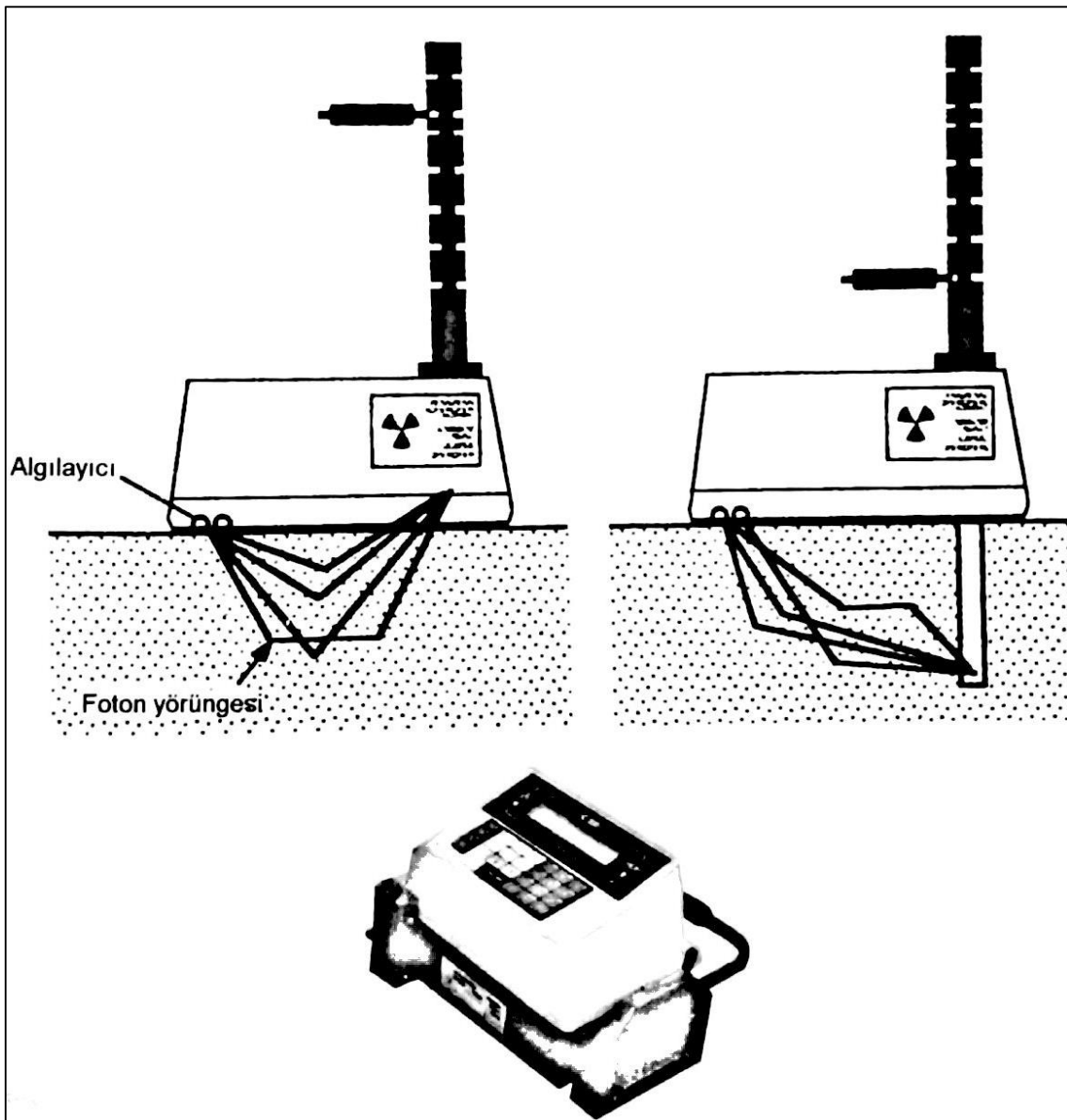
Kum, su ve yağ doldurma yöntemlerinde zeminin her sıkıştırılan tabakası için birim hacim ağırlık ve su muhtevası ölçümü ile başlar. Buradan zeminin su muhtevası bulunacaktır. Ardından açılmış çukurun hacmi içine doldurulan üniform kum, ağır dişli yağı ya da bir balon içinde su doldurularak duyarlı biçimde ölçülür. Şekil 2.6 'da bu ölçüm yöntemleri gösterilmiştir. Açılacak çukurun hacmi gerecin maksimum dane çapına bağlı olduğundan baraj dolgularında birkaç yüz litreden çekirdek dolgularında birkaç litreye değişebilmektedir [1].



Şekil 2.6 Birim hacim kontrolünde çukur hacmin sırasıyla kum, balon ve yağ doldurma yöntemleriyle ölçümü [1].

Dolgunun iri daneler içermemesi durumunda birim hacim ağırlık zemine çapı 5-15 cm olan çelik tüp çakma yoluyla bulunabilir. Bu yöntemin olumlu yanı γ_n , γ_k , w_{opt} değerlerini ölçme yanında laboratuvarda gerçekleştirilecek mekanik deneylere az örselenmiş numune sağlamasıdır [1].

Geleneksel yöntemlerle su muhtevasının güvenilir olarak ölçümü uzun zaman aldığından 1970'lerden bu yana sıkıştırma kontrolleri nükleer yöntemlerle yapılmaktadır. Bu yöntemin tek sorunu kullanılan aletin yüksek maliyetidir. Bunun yanında su muhtevası ve birim hacim ağırlığı birkaç dakika içinde verdiğiinden dolgu işlemlerinde yüksek hız sağlamaktadır [1].



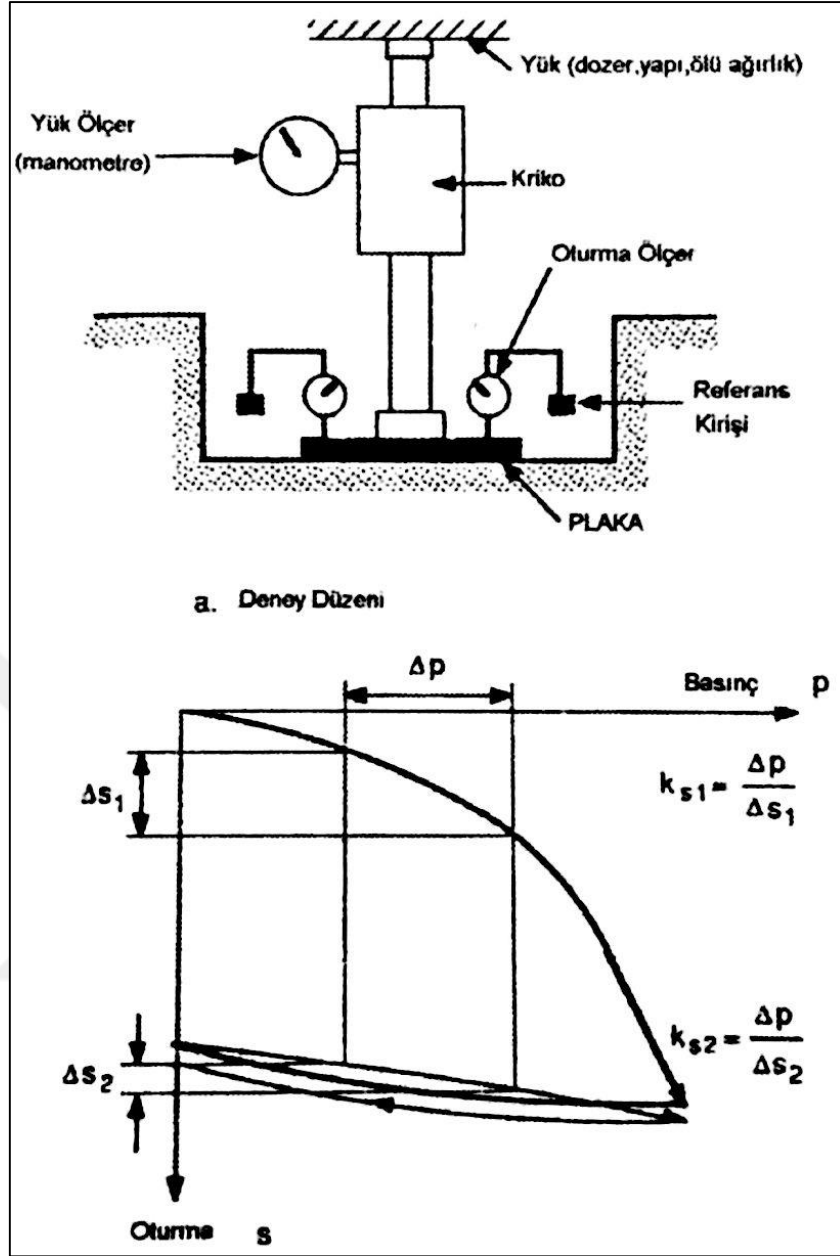
Şekil 2.7 Nükleer ölçüm aygıtları [1].

Sıkıştırmanın ilk amacı zeminin kayma direncinin yükseltilmesidir. Bunun sağlandığı en basit biçimde laboratuvarda erişilen γ_k ve w_{opt} değerlerinin arazide ölçümü ile kanıtlanabilir. Bu ölçüm bir anlamda kayma direncinin dolaylı olarak kontrolü anlamına gelmektedir. Bunu yapabilmek adına kontrol doğrudan zeminin taşıma gücünün plaka taşıma, taşıma oranı deneyi (CBR), ve proktor iğnesi ile gerçekleştirilmektedir [1].

Proctor tarafından 1933'te geliştirilen deneyde çapı 30 mm olan bir iğne zemine batırılarak gördüğü direnç ölçülür. Optimumun kurusunda ölçülen yüksek penetrasyon dirençleri optimuma yaklaştıkça birim hacim ağırlık yükseldiği halde düşüş göstermektedir. Bu durumda gözetilen, hizmet sırasında doygunluğa ulaşan zeminin nasıl direnç göstereceğidir [11]. Son zamanlarda iğne yöntemi rağbet görmezken, yerine statik penetrometre ölçümü yapılmaktadır [1].

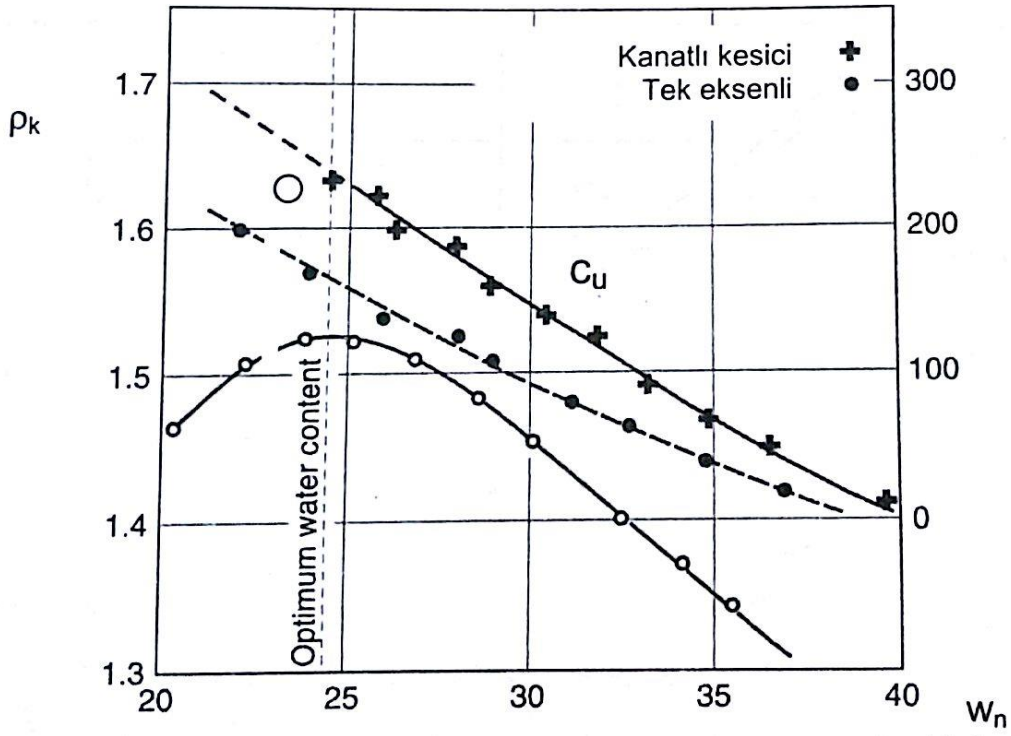
İğne yönteminde olduğu gibi CBR yönteminde laboratuvarda w_{opt} - γ_{kmax} şartlarında hazırlanıp, suda bekletilen numunenin içine 50mm çaplı bir silindir itilirken oluşan direnç ölçülerek bu direnç kırmataşın direncine oranlanmaktadır. Burada ölçülen penetrasyon direncinin arazide de aynı biçimde elde edildiğini kontrol etmek amacıyla da ayrıca CBR deneyi yapılır [1].

Kalite kontrolünün önemli olduğu hava alanı gibi yapılarda uygulanan kompaksiyon işlemlerinde zeminin taşıma gücünün doğrudan ölçülmesi gerekir. Böyle bir durumda çapı 1 ft karşılığı olan 300 m'den, 760 mm'ye kadar değişen plakalar ASTM D-1194, D-1195 ve D-1196 uyarınca sıkıştırılmış doğal zemin, alttemel veya temel üzerinde yüklenir. Bu konudaki Türk Standardı TS 5744/1988 yerini alan Eurocode 7 ise 1997-3'dür. Şekil 2.8'de plaka yükleme deneyi özetlenmiştir. Plaka zemine oturtulup yataylandıktan sonra artan yüklere karşı beliren ortalama oturmalar ölçülür. Yükleme taşıma gücü aşılanaya kadar yada istenen plaka oturması elde edilene kadar sürdürülmektedir. Yüklemeyi bazen durdurup boşaltma-yeniden yükleme ilmiğini de oluşturmak mümkündür [1].



Şekil 2.8 Plaka yükleme deneyi [1].

Sıkıştırılması önemli olan killi numunelerde denetimin hızla yapılabilmesi için kanatlı kesici deneyinin laboratuvar ve arazide kullanımı araştırılmıştır. Şekil 2.9’da kanatlı kesici deneyinde ölçülen drenajsız kayma direncinin artan su muhtevası ile değişimi görülmektedir.



Şekil 2.9 Drenajsız kayma direncinin su muhtevası ile değişimi [1].

Burada beklendiği gibi kanatlı kesici ve serbest basınç deneyi sonuçlarının paralellik gösterdiği ancak okumaların optimumun kurusunda da yükselmesi nedeniyle optimum kuru birim hacim ağırlık değerinin tam kestirilemeyeceği anlaşılmaktadır. Öte yandan laboratuvarında γ_{kmax} 'a karşılık okumanın tam ölçülerek araziye uzatımı da mümkün olacaktır [1].

Laboratuvarında standart ve modifiye proktor deneyleri ile elde edilen sonuçları göre, arazide doğal durumda yapılan kompaksiyonun kontrolünde ana kriter, görelî (izafî) sıkışma değeridir. Rölâtif kompaksiyon diye de adlandırılan bu değer aşağıdaki formül ile elde edilir [2].

$$\text{Görelî Kompaksiyon} = \gamma_{k(arazi)} / \gamma_{kmax(lab)}$$

Burada γ_k , numunenin arazi koşullarındaki kuru birim hacim ağırlığını, γ_{kmax} ise aynı zeminin laboratuvarında kompaksiyon deneyleri sonucu, optimum su muhtevası değerinde sıkıştırılarak elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığı ifade etmektedir [2].

Görelî kompaksiyon değerinin tayini için sırasıyla, dolgudan sıkıştırılmış tabaka kalınlığınca, sıkıştırma deneyine yeterli olacak numune çıkarılır. Alınan numunenin ıslak ve kuru ağırlıkları ve su içeriği bulunur. Numunenin çıkarıldığı boşluk standart bir kum ile

doldurulup, malzeme ağırlığına göre boşluk hacmi hesaplanır. Numunenin kuru ağırlığı ve hacmi yardımıyla kuru birim hacim ağırlık bulunur. Elde edilen bu değer $\gamma_{kmax(lab)}$ değerine bölünerek görelî kompaksiyon bulunmuş olur. Uygulamada görelî kompaksiyon değerinin %95 civarında olması yeterli görülmektedir [2].

Arazide kompaksiyon etkileyen başlıca kriterler;

Zeminin:

- Granülometresi
- Su muhtevası
- Sıkılık derecesi

Makinenin:

- Ağırlığı ve boyutları
- Uyguladığı basınç miktarı
- Titreşimli araçlarda, titreşim frekansı

Sıkıştırma yöntemi:

- Sıkışma kalınlığı
- Aracın geçiş hız ve sayısı
- Titreşim frekansı

2.5 KOMPAKSİYON (SIKIŞTIRMA) ARAÇLARI

İnce daneli ve iyi derecelendirilmiş zeminlerin kompaksiyonunda çelik bandajlı, çelik ayaklı ve lastik tekerlekli araçlar kullanılır.

2.5.1 Düz ve Çelik Bandajlı Silindirler

Zemin numunesini %100 temas ile sıkıştırdığından her çeşit zeminin kompaksiyonunda kullanılır. Tek, çift ve üç bandajlı olmak üzere 3 çeşittir. 1.5 ton ile 18 ton arasında değişen ağırlıklara sahiptir. Yaklaşık 400 kPa basınç uygular. Dolguların ve karayolu kaplamalarının sıkıştırılmasında kullanılır [11]. Pürüzsüz ve kompakt bir yüzey oluşturur [12]. Granülometresi iyi ince dane-iri dane karışımı ve kaya dolgularda en iyi neticeyi verirler [3]. Kompaksiyon kalınlığı 20 ile 30 cm dir. Bu araçlar ile düzgün satırlar elde edilebilir. Bundan dolayı kompaksiyonda son sıkıştırmanın düz ayaklı silindirlerle (çelik bandajlı) yapılması

uygun olacaktır [2]. Düz ayaklı silindirlerin daha çok ağır kil zeminler için kullanılması uygundur [13].



Şekil 2.10 Düz silindir [14].

2.5.2 Keçi Ayaklı ve Küt Ayaklı Silindirler

Bu tip silindirlerin üzerine çıkıntılar (veya ayaklar) eklenmiştir. Stabil çizgisel yük yerine ayakların uçları ile zemine kompaksiyon uygular. Ayaklarının çapı yuvarlak ve uzun ise keçi ayağı silindir, dikdörtgen veya kare kesitli fakat daha geniş alanlı ve kısa olanlarına küt ayak silindir denir [5]. Sıkıştırdığı zemine %8 ile %12 arası temas ederken, 1400 ile 7000 kpa arasında basınç uygularlar [11]. Sıkıştırılacak zemin, kalınlığı 25-30 cm ve ince daneli (kohezyonlu) olmalıdır [2].



Şekil 2.11 Küt ayaklı silindir [3].



Şekil 2.12 Keçi ayaklı silindir [11].

2.5.3 Vibrasyonlu (titreşimli) Kompaksiyon Silindirleri

Bu tür silindirler basınç uygularken aynı zamanda titreşim gücünden de faydalanarak sıkıştırma yapar. Genelde iri daneli (kohezyonsuz) zeminlerde kullanılırlar [11]. Kumlu ve çakıllı zeminler için uygun olan bu silindir ince daneli zeminlerin iç stabilizasyonunu bozduğundan dolayı olumsuz etki yapar. Sıkıştırdığı zeminin etki değeri 30 cm ile 40 cm arasında bir değerdir. Zeminin granülometresi iyi değil ise bu araç ile fazla sayıda sıkıştırma daneler arası çözülmeye yol açabilir. Bu hususa dikkat edilmelidir [2].



Şekil 2.13 Vibrasyonlu (titreşimli) silindir [11].

2.5.4 Lastik Tekerlekli Silindirler

Bibirine yakın şekilde duran, lastik tekerleklerden oluşan silindir türüdür. Uygulandığı zeminin yaklaşık % 80'ne temas eder. Yaklaşık 700 kPa kadar bir basınç uygulayabilirler. İri ve ince daneli zeminlerin her ikisinde de uygulanabilirler [2]. Kendi hareket eden yada çekilerek hareket eden iki çeşit tipi vardır. Hafif, orta, ağır olmak üzere üç boyda olurlar [6]. Daha çok alt yapı sıkıştırmalarında kullanılırlar.



Şekil 2.14 Lastik tekerlekli silindir [11].

2.5.5 Darbeli Sıkıştırma Araçları

Bu tür araçlar küçük hacimli işlerde, büyük sıkıştırma araçlarının ulaşamadığı yerlerde kullanılırlar. En yaygın kullanılanı, tek kişi tarafından kullanılan motorun çalışması durumunda havaya fırlayabilen ve pratikte kurbağa olarak anılan elektronik otomatik tokmaklardır [2].

Zemin türlerine göre uygun kompaksiyon(sıkıştırma) araçları Çizelge 2.1’ de toplu şekilde gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 Zemin türüne göre uygun ve uygun olmayan sıkıştırma araçları [2].

Araç Tipi	Uygun Zemin Türü	Uygun Olmayan Zemin Türü
Düz Silindir	GW, SW, ML, CL	SP, SM, CH
Keçi Ayaklı Silindir	SC, GC, CL, CH	GP, SP, SW
Lastik Tekerlekli Silindir	GW, SW, SM, ML, CL	CH, OH
Titreşimli Silindir	GW, SW	CL, CH, ML, MH, OH

2.6 DONMA DURUMLARINDA KOMPAKSİYON

Deformasyon sonucu oluşan genişmeden dolayı zeminin sıkılığı ve yoğunluğunda düşme meydana gelir. Zemindeki donma olaylarının sonra ermesi ile artan su muhtevası üst yapıların taşıma gücünde azalmaya yol açar [6].

AASHTO-99'a göre zeminin w_{opt} değerinden daha fazla su muhtevası içerdiği durumlarda kohezyonlu zeminlerin kompaksiyonu esnasında zeminin geçirimliliği düşürülebilir. Meydana gelen bu düşme, donma bölgesinde su yükselmesini geciktirir. Bu gecikme don zamanlarından daha ötesi bir zamana kadar sürdüğü takdirde don olayı gerçekleşmeyebilir. Dondan kaynaklı kabarma azalabilir. Yapılan incelemeler sonucunda, w_{opt} değerinden daha fazla su içeriği durumlarında daha az don kabarması olduğu ortaya çıkmıştır [6].

2.7 HAVA OLAYLARININ KOMPAKSİYONA ETKİSİ

Bilindiği üzere hava şartları, yapı imalatları süresince çok önemli bir yere sahiptir. Soğuk ve yağışlı hava şartlarında özellikle kil dolguların sağlıklı yapılma olasılığı oldukça düşüktür. Aksine iri daneli, kaya dolgu türleri sıcak havalarda olduğu gibi yağışlı hava şartlarında da yapılabilirler.

Herhangi bir donma olayına maruz kalmayan bir zeminin sıkıştırılmasına nazaran donmuş bir zeminin sıkıştırılması daha zordur. Özellikle kil zeminlerin boşluklarında bulunan suyun donması aynı zeminin kompaksiyonuna oldukça zorluk teşkil edecektir.

Hava olaylarından en çok etkilenen dolgu türleri yarı geçirgen ve ince daneli zeminlerdir. Böyle zeminler sıcak hava durumlarında su muhtevalarını kaybederler. Dolayısıyla w_n değeri düşük değerlere ulaşır. Bu zeminlerin dolgu olarak kullanılmaları gerektiğinde, su muhtevalarının en az w_{opt} değerlerine getirilmelidir.

Kış aylarında yapılan kompaksiyon, asla yaz aylarında yapılan kompaksiyon kadar sağlıklı olamaz ve kış aylarında yapılan dolgularda daha fazla oturma meydana gelir. Kış aylarında yüksek-orta ağırlıktaki titreşimli silindirler ve titreşimli keçi ayaklı silindirler kullanılması daha faydalı olacaktır [6].

2.8 İNCE DANELİ ZEMİNLERİN KOMPAKSİYONU

İnce daneli (kohezyonlu) zeminlerin kompaksiyonu, zeminin yapısı, içerdiği kil oranı, zeminin plastikliği, su muhtevası, doygunluk durumu, kompaksiyon miktarı, zeminin kalınlığı, kompaksiyon araçları gibi faktörler ile ilintilidir [15].

Standart bir enerji altında sıkıştırılan ince daneli zeminlerde su muhtevası artarken geçirimsizlik azalır. Bu azalış w_{opt} değerine kadar devam edip, bir süre sonra küçük bir artma göstermektedir. Sıkıştırma enerjisi artar ise zeminin boşluk oranı düşer dolayısıyla geçirgenlikte azalır. Özetle ince daneli zeminlerin düşük permeabilite olması adına, olabildiğince w_{opt} değerinden fazla su ve yüksek enerji ile sıkıştırılması gerekmektedir [3].

Killi zeminler w_{opt} değerinden daha düşük bir su içeriğinde sıkıştırıldığında şişme potansiyeli büyür. Killi zeminler suya ihtiyaç duyan ve su emebilme kapasiteleri yüksek zeminlerdir. Dolayısıyla w_{opt} değerinden daha yüksek su muhtevası durumlarında sıkıştırılan ince daneli zeminler su azalmasıyla kuruma halinde büzülme durumuna geçerler [16].

Kabarma potansiyeli yüksek olan killi zemin türleri w_{opt} değerinden %1-3 kadar daha yüksek bir su muhtevasında kompaksiyon uygulandığında, zamanla kabarma (şişme) basınç ve miktarı düşerken, suya temasları durumunda az oranda emme eğilimleri ile daha fazla dayanım gösterirler [3].

w_{opt} değerinden daha az su muhtevalarında yapılan kompaksiyon işlemlerinde, zeminin, uygulanan enerjinin de yükselmesi ile birlikte dayanımında belli bir yükselme olurken, w_{opt} değerinden daha fazla su muhtevalarında yapılan kompaksiyon işlemlerinde zeminin dayanımının, uygulanan enerji ile herhangi bir bağlantısının olmadığı görülür. Bundan ötürü w_{opt} değerinden daha fazla su muhtevalarında, ince daneli zeminler üzerinde yapılan kompaksiyon işlemlerinde, ağır sıkıştırma araçları ve/veya fazla geçiş yapmanın tesiri olmayacaktır. Aynı durum arazi şartlarında, çok yüksek sıkıştırma enerjisi ile uygulandığında, boşluk suyu basıncının artmasına ve zeminin dayanımında azalmaya neden olacağı göz ardı edilmemelidir [5]. Benzeri sebeplerden ötürü özellikle killi zeminlerin yoğurularak sıkıştırılması, gerek zemin içerisinde geçirimsizlikten ötürü hapsolan havanın tahliyesi gerekse zeminde sağlıklı kompaksiyonun elde edilmesi adına önemlidir.

2.8.1 Killi Zeminlerin Kompaksiyonu

Killi zeminler plastik özelliklere sahip olduğundan ve su ve don olaylarından çok fazla etkilendiklerinden, kompaksiyonları zor ve doğrudan su içeriğine bağlıdır. Killi zeminlerde en iyi kompaksiyona γ_{kmax} ' tekabül eden w_{opt} değerinde ulaşılır. Killi zeminleri, boşluk oranlarını azaltmak, dolayısıyla geçirimliliklerinin düşmesi ve su emme özelliğinin azalıp stabil hale geçirilmesi, ayrıca don ve oturma olaylarına karşı dirençli olması adına iyi bir kompaksiyona tabi tutulmalıdırlar.

Killi zeminlerin kompaksiyonunda iri daneli zeminlere göre daha yüksek sıkıştırma enerjisi gerekmekte ve kompaksiyon öncesinde serilme tabakası iri daneli zeminlere göre daha ince olmalıdır. Killi zeminlerin kompaksiyonunda daha sağlıklı verim almak adına titreşimli keçi ayaklı silindirler, bir miktar kum içermesi durumunda ise titreşimsiz keçi ayaklı silindirler veya lastik tekerlekli silindirler kullanılmalıdır [3].

Killi zeminlerin boşluk oranları vibrasyon veya birim alana gelen yükler ile düşmez. Buna nazaran keçi ayaklı silindirler bu oranın azaltılmasında önemli role sahiptirler ve kompaksiyonun kalitesini büyük oranda belirlerler. En sağlıklı neticelere w_n değeri, plastik limite yakın değerlerdeyken ulaşılır. Şayet w_n değeri plastik limitten fazla derecede büyük ise sıkıştırma aracı kil zemine batma durumu gösterecektir. Tam tersi durumda ise kil topraklar parçalanamaz ve aralarındaki mesafeler açılır [17].

2.8.2 Siltli Zeminlerin Kompaksiyonu

Bu tür zeminler nonplastik veya düşük plastisiteli zeminlerdir. Siltli zeminler w_{opt} değeri civarlarında sıkıştırılabilirler. Bu zeminler en sağlıklı şekilde küt ayaklı silindirler ile sıkıştırılırlar. Şayet silt daneleri çok ince ise titreşimli keçi ayaklı silindirler kullanılabilir. Siltli zeminler ince kum içerdiklerinde yüksek su muhtevalarında basitçe likit duruma geçebilirler. Bu nedenle w_{opt} değerinde kompaksiyonları daha sağlıklı olacaktır [17].

Siltli zeminler de kompaksiyon, zeminin içerdiği nem miktarına bağlıdır. Nonplastik homojen ince daneli zeminlerde bu durum önemlidir. Şayet su muhtevası w_{opt} 'a eşit değil ise bu zeminler tamamen sıkıştırılamazlar [3].

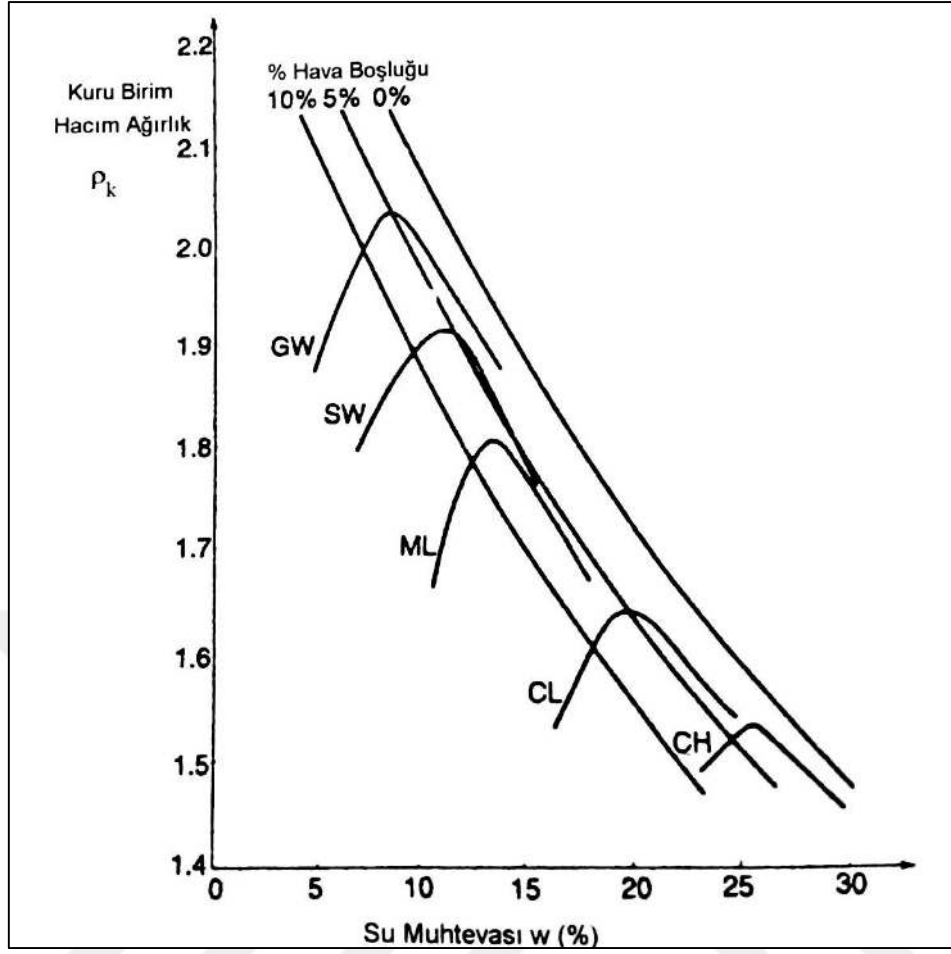
2.9 İRİ DANELİ ZEMİNLERİN KOMPAKSİYONU

İri daneli zeminler kompaksiyon esnasında, ince daneli zeminlere göre daha geçirimli olduklarından, sıkıştırma durumlarındaki su muhtevalarından dolayı çok etkilenmezler [3].

İri daneli zeminlerin kompaksiyonu neticesinde sıkılıkları artarken, buna bağlı olarak kayma gerilmesinde yükselişler, yük altında sıkışmada azalışlar meydana gelir. Bundan dolayı iri daneli zeminler sıkıştırıldıklarında taşıma güçleri artarken, meydana gelebilecek oturmalar azalacaktır [5].

İri daneli zeminlere plastisitesi düşük ince daneli zemin karıştırıldığında, artan ince dane oranı ile γ_{kmax} artar, bir süre sonra azalır. Artan ince dane oranı ile w_{opt} azalırken bir süre sonra artacaktır. Kohezyonsuz zeminin özelliklerine göre takriben %15-35 oranlarında, ince daneli zeminin iri daneli zemin ile karıştırılması sonucunda γ_{kmax} ve kohezyon artar, ama meydana gelen karışımın drene yeteneği, ve içsel sürtünme açısı azalır [14].

Şekil 2.15’de çeşitli zemin türlerinin kuru birim hacim ağırlığa etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.15 Zemin türlerinin kuru birim hacim ağırlığına etkisi [1].

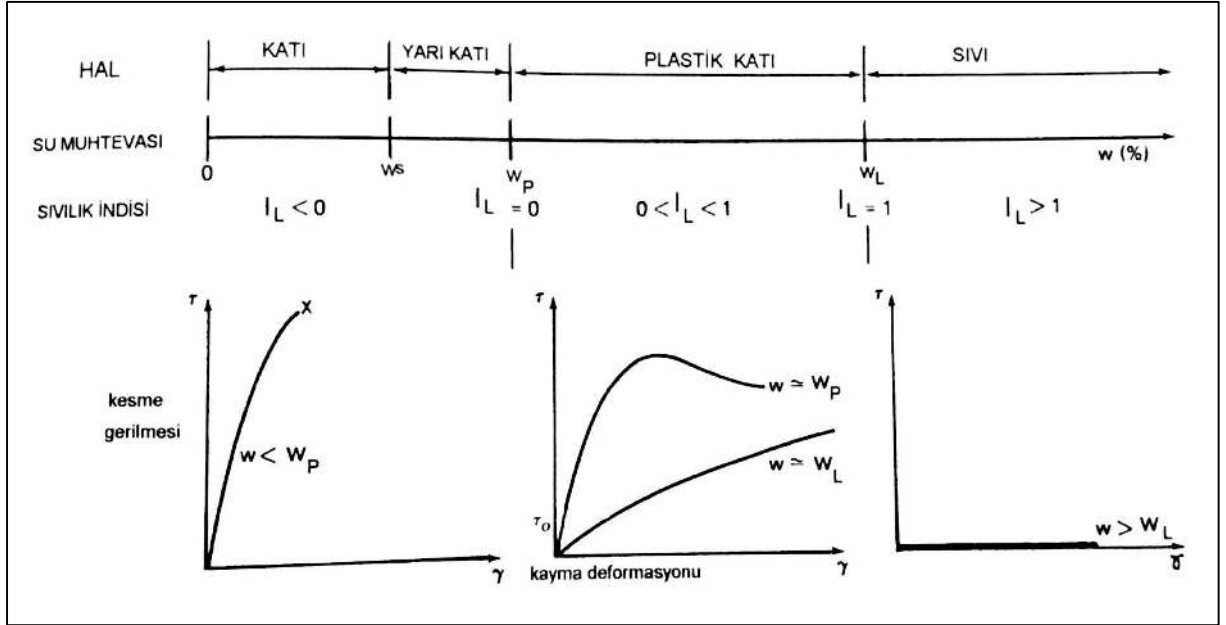
Şekil 2.15'den anlaşılacağı üzere iri daneli zeminler daha düşük w_{opt} değerlerinde, daha yüksek γ_{kmax} 'a sahip iken ince daneli zeminler ise, daha yüksek w_{opt} değerlerinde daha düşük γ_{kmax} 'a sahiptirler.

2.10 KOMPAKSİYON ÜZERİNDE ETKİLİ ZEMİN PARAMETRELERİ

Zeminlerin kompaksiyonunu genel anlamda dane dağılımları, kıvam limitleri gibi parametreler etkiler.

Özellikle killerin suyla karşılaştıklarında gösterebileceği davranışın en az iki parametre ile tanımlanması gerekeceği Attaberg tarafından; viskoz akmanın üst limiti, viskoz akmanın alt limiti (likit limit), çamurun metale yapışma özelliğini yitirmesi (yapışma hali), kilin plastisite

özelliğini yitirdiği limit, su kaybının hacim azalmasıyla doğru orantılı olarak kaybı (büzülme limiti) limitleriyle açıklanmıştır [1].

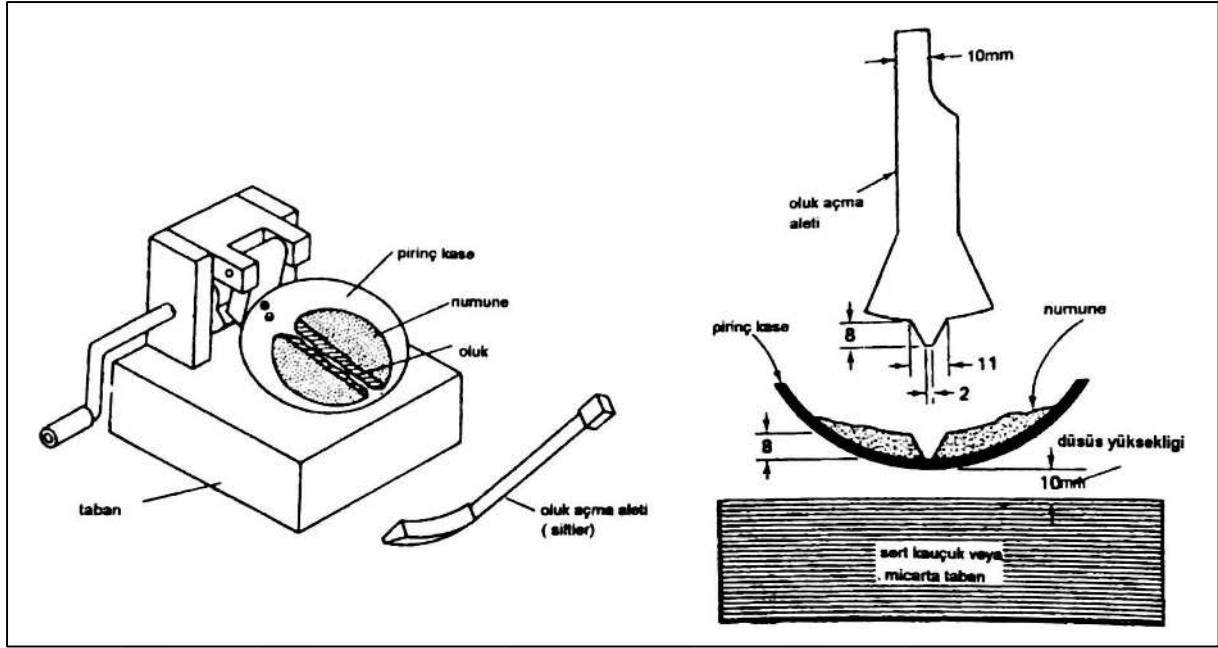


Şekil 2.16 Kıvam limitleri ve reolojik anlamı [1].

2.10.1 Likit Limit

Kil çok fazla su ile karıştığında daneler arasındaki bağ kaybolmakta ve viskozite 3 ila 8,5 kPa dolayına düştüğünde zemin Newton sıvısı özellikleri göstermeye başlamaktadır. Likit limit, kil-su karışımının sıvı halden plastiğe dönüştüğü su içeriği olarak tarif edilmiştir. Likit limitin ölçümü için karışım viskozitesinin bir yöntemle su içeriğinde değişimle bağlantısı çıkarılır [1].

Mühendislik amaçları adına likit limit ölçümü ilk kez Casagrande tarafından Şekil 2.17’de gösterilen aletle yapılmıştır [18].

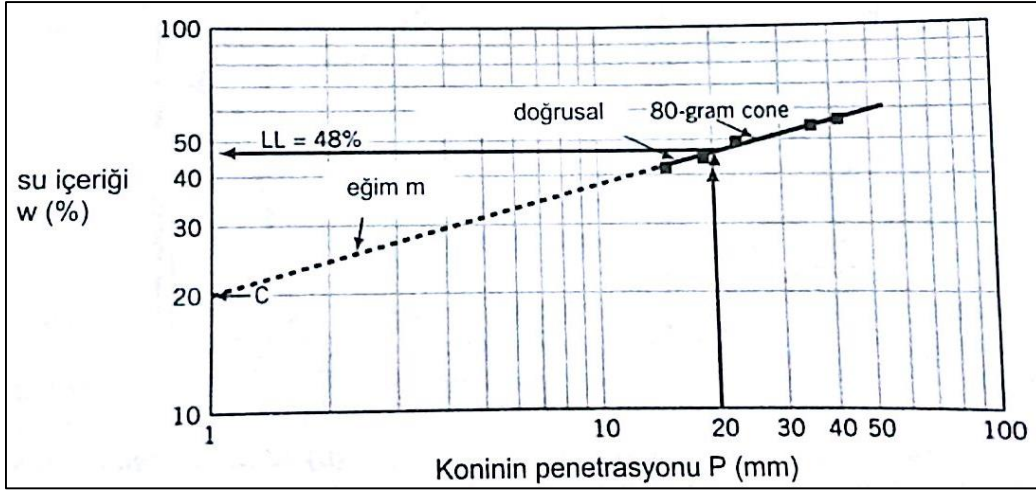


Şekil 2.17 Casagrande likit limit ölçüm aleti [18].

Pirinç bir tas içine yatay olarak yerleştirip, ortasına özel kaşığıyla bir oluk açılan çamurun tas lastik tabana 10 mm yükseklikten 25 kez düşürüldüğünde kapanmasını sağlayan su içeriği olarak tariflenmiştir [1].

2.10.2 Plastik Limit

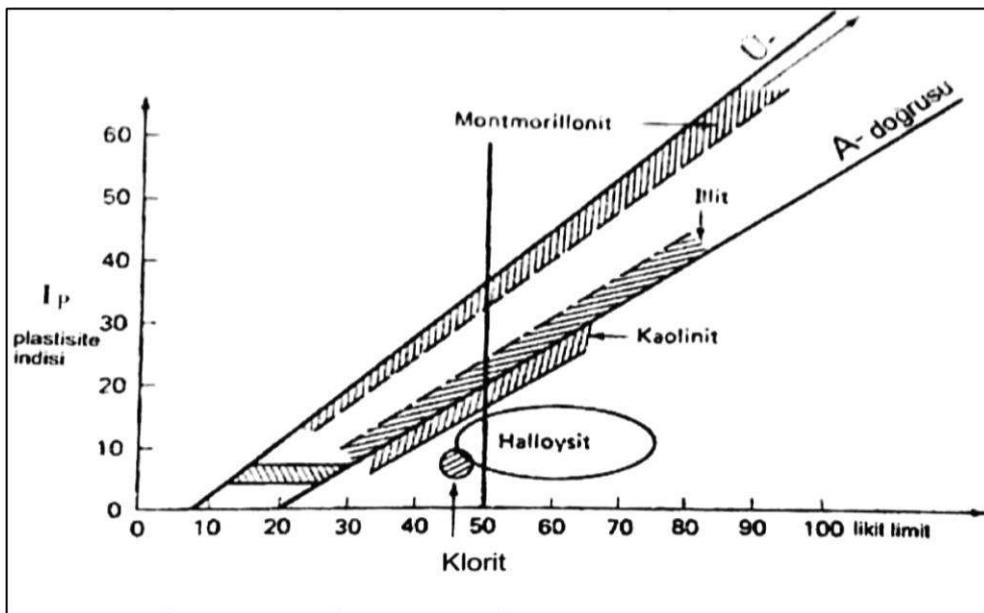
Plastik limit, zemin-su karışımının kile şekil verildiğinde bunu çatlamadan aldığı ve bu şekli değiştirmede en düşük su muhtevası olarak tanımlanır. Plastik terimi şekil verilebilir anlamını taşır. Ölçüm, buzlu cam üzerinde el ayası altında yuvarlanarak ip haline getirilen zeminin 3 mm kalınlığa düştüğünde 3-10 mm uzunlukta parçalara ufalandığı su muhtevasının tayini ile yapılmaktadır [1]. Ancak, burada da deney operatör önyargısına açık olduğundan dolayı bu ölçümün de koni yöntemiyle gerçekleştirilmesinin uygun olacağı öne sürülmektedir [19].



Şekil 2.18 Plastik limitin koni düşürme deneyi ile bulunması [1].

2.10.3 Plastisite İndisi

Kil- su karışımının plastik özellikler taşıdığı su içerikleri plastisite indisi ile ifade edilir. Genel olarak likit limit ile plastik limit arasındaki farkı temsil eder. Bir başka deyişle bir zeminin yüksek plastisite indisine sahip olması çamur haline gelmek için fazla su alması gerektiğini gösterir. Bu ifadeyle plastik olmayan yani likit ve plastik limitlerin aynı olduğu bir siltin plastisite indisi sıfır olmalıdır. Yapılan incelemeler zeminlerin likit limiti ile plastisite indisi arasında yakın bir ilişki olduğunu, kil mineralleri ve jeolojik kökeni belirli zeminlerin Şekil 2.19'da gösterildiği gibi belli noktalarda kümелendiğini göstermiştir [1].



Şekil 2.19 Kil minerallerinde likit limit-plastisite indisi arası ilişki [1].

2.10.4 Likidite ve Kıvam İndisleri

Zeminin doğal kıvamının, plastik bölge içinde daha iyi ve detaylı tarifini mümkün kılan parametrelerdir. Sıvılık indisi olarak da adlandırılırlar.

$$\text{Likidite İndisi (LI)} = (w_n - PL) / PI \quad (2.4)$$

$$\text{Kıvam İndisi (KI)} = (LL - w_n) / PI \quad (2.5)$$

$$LI + KI = 1 \quad (2.6)$$

Sıvılık indisinin 1 olması zeminin arazide likit limite yakın bir su muhtevasını, sıfır olması plastik özelliklerin alt limitini, sıfırdan küçük olması ise kuruluk yani kilin aşırı konsolide (sert) özelliğini taşır. Bazı ince daneli zeminlerin sıvılık indisi 1'den büyük çıkmaktadır. Bu durum zeminin yerinde akışkan kıvamda olduğunu ve ciddi zemin problemlerinin varlığını ihtiva eder [1].

BÖLÜM 3

İSTATİSTİKSEL ANALİZLER

İstatistik biliminin temel uğraşı alanlarından birisi de, bir değişkendeki değişimin bir model ile tahmin edilmesi ilişkin yöntem ve metotların geliştirilmesidir [20]. İstatistikte bu yöntemlerden, iki veya daha fazla değişken arasındaki istatistiksel ilişkinin matematiksel fonksiyon yapısının elde edilmesinde, regresyon analizi öne çıkmaktadır [21].

Regresyon analizinin temel amacı, iki ya da daha fazla rasgele değişken arasındaki istatistik ilişkinin şeklini oluşturmak, değişkenlerin birbiri üzerindeki değişim yüzdelerini hesaplamak ve bağımlı değişkeni, bağımsız değişkenlerin değerine göre tahmin etmektir [22].

3.1 İSTATİKSEL DEĞİŞKENLER

Verilerin incelenip, sağlıklı bir şekilde karşılaştırılması için istatistiksel değişkenler oldukça önemlidir. Bir istatistik değer sayısal olarak merkezi eğilim ve dağılım değişkenleri ile temsil edilir. Merkezi eğilim değişkenleri ortalama ve medyan olarak gösterilebilir. Uygun bir dağılımda ortalama ve medyan çakışmalıdır [23].

Standart sapma ve varyans gibi değişkenler dağılımın normalden sapma derecesini gösterirken, kartiller ise toplam serinin çeşitli frekans ve parsellerde incelenmesine olanak tanır.

3.1.1 Aritmetik Ortalama

Genel olarak aritmetik ortalama, pratik veya teorik tüm veri dizisinin toplanması ve bu toplamın veri sayısına bölünmesi ile elde edilen bir sayıdır. Veri setinin merkez konum ölçüsüdür.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.1)$$

3.1.2 Medyan (Ortanca)

Bir veri setini büyükten küçüğe veya küçükten büyüğe sıraladığımızda tam orta noktadan veri setini iki eşit parçaya ayıran değere medyan (ortanca) adı verilir. Veri setinde aşırı uçlu elemanlar olduğunda aritmetik ortalamaya göre daha güvenilirdir. Medyan, veri setindeki tüm elemanlardan etkilenmez.

3.1.3 Standart Sapma

Standart Sapma istatistiksel analizde büyük önemi olan bir dağılma ölçüsüdür. "Kareli Ortalama Sapma" adı da verilen bu ölçü "değişkenlerin aritmetik ortalamadan sapmalarının kareli ortalaması"dır.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - X_A)^2} \quad (3.2)$$

3.1.4 Kartil

Gözlem değerleri küçükten büyüğe doğru sıralanmış bir seriyi nispi frekansları m / n ve $(n-m) / n$ olan iki kısmi seriye ayıran ortalamaya kartil denir (m : kartilin sırası, n : serideki eşit parça sayısı). Q1 (%25 dilim), Q2 (%50 dilim), ve Q3 (%75 dilim), simgeleri ile gösterilir.

3.1.5 Varyans

Verilerin ortalama değer etrafındaki saçılmalarını kontrol eder. Gözlemsel verilerin her birinin ortalama değerden olan farklarının karelerinin aritmetik ortalaması varyans (değişinti) olarak tanımlanır.

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - X_A)^2 \quad (3.3)$$

3.2 KORELASYON ANALİZİ

En az iki değişken arasındaki ilişkinin incelenmesine korelasyon denir. Bu tanıma göre korelasyon; iki değişken arasında olabileceği gibi ikiden çok değişken arasında da olabilir.

İki değişken arasındaki korelasyon doğrusal olabileceği gibi eğrisel de olabilir. İki den çok değişken arasındaki korelasyona ise çoklu korelasyon denir. Çoklu korelasyon katsayısının değişken sayısı arttıkça formüller ile hesabı zorlaşır, bu durumda programlar vasıtasıyla hesaplanabilmektedir. Ayrıca negatif değerler almaz.

Korelasyon analizi, serbest ve bağımlı değişkenler arasındaki ilişki düzeyini veya derecesini ölçen analizdir. Şayet analizde tek bir bağımsız değişken varsa, bu tür analize basit korelasyon analizi, birden çok bağımsız değişken söz konusu ise buna da, çoklu korelasyon adı verilir. Bilimsel araştırmalarda en çok kullanılan basit korelasyon analizidir. Ortalamadan sapmaların esas alınarak ilişki düzeyinin saptanması için uygulanan testlere korelasyon analizi denir [24].

Korelasyon katsayısı, değişkenlerin yönü, etkileşimlerin nasıl olduğu hakkında bilgi verir. Değişkenlerin birbiri arasında etkileşim var mı, varsa etkileşimin çok fazla mı yani kuvvetli mi olduğu ve gözlem gruplarından birinin gözlem değerleri artarken diğeri azalıyor mu yoksa aynı yönde mi değerleri değişiyor olduğu gözlenebilir [25].

Korelasyon katsayısı -1 ile +1 arasında değişen değerler alır. Katsayı, etkileşimin olmadığı durumda 0, tam ve kuvvetli bir etkileşim varsa 1, ters yönlü ve tam bir etkileşim varsa -1 değerini alır. Korelasyon katsayısı genellikle R harfiyle gösterilir. Buna göre; korelasyon katsayısını $-1 \leq R \leq +1$ eşitsizliğiyle gösterebiliriz [25].

Korelasyon katsayısının yorumunu, tam değerler dışında ara değerler için yapmak oldukça güçtür. Ara değerler için katsayı değerlendirirken, örnek gözlem sayısı (n) oldukça önemlidir. Çok fazla gözleme dayanan değerlendirmelerde 0.25'e kadar düşmüş bir korelasyon katsayısı bile anlamlı sayılabilmektedir. Fakat az sayıda, 10-15 gözleme dayanan değerlendirmelerde korelasyon katsayısının 0.71 üstünde olması beklenir. Korelasyon katsayısının (R) değerine göre korelasyonun derecesi hakkında aşağıdaki yorumlar yapılabilir [25]:

Kuvvetli (-)	Orta (-)	Zayıf (-)	Zayıf (+)	Orta (+)	Kuvvetli(+)
-1 <R<-0.9	-0.9<R<0.5	-0.5<R<0	0 <R< 0.5	0.5<R< 0.9	0.9<R< 1

Korelasyon katsayısı, iki değişkenin zaman içinde birlikte aynı yönde veya ters yönde değiştiğini ortaya koyan bir katsayıdır. Bu nedenle, Korelasyon katsayısı neden-sonuç ilişkisi belirtmediği gibi, niçin böyle bir ilişkinin bulunduğu konusunda da bilgi vermez [26].

Çeşitli korelasyon katsayıları mevcuttur. Değişkenlerin ilişkilerinin doğrusal olması durumunda en çok kullanılan yöntem Pearson yöntemidir. Değişkenlerin ilişkilerinin doğrusal olmaması durumunda Kendall ve Spearman yöntemlerini kullanmak daha sağlıklı sonuç verecektir. Pearson katsayısı aşağıdaki formülle hesaplanır [25].

$$r = \frac{\Sigma XY - (\Sigma X)(\Sigma Y)/n}{\sqrt{\Sigma(X^2 - (\Sigma X)^2/n)(\Sigma Y^2 - (\Sigma Y)^2/n)}} \quad (3.4)$$

Hesaplanan korelasyon katsayısının anlamlı ve güvenilir bir sonucunun olup olmadığı, bu katsayının anlamlılığının ölçülmesi ile mümkün olabilmektedir. Bu anlamlılık, bir sonuç testi olan “t testi” ile yapılabilir [24].

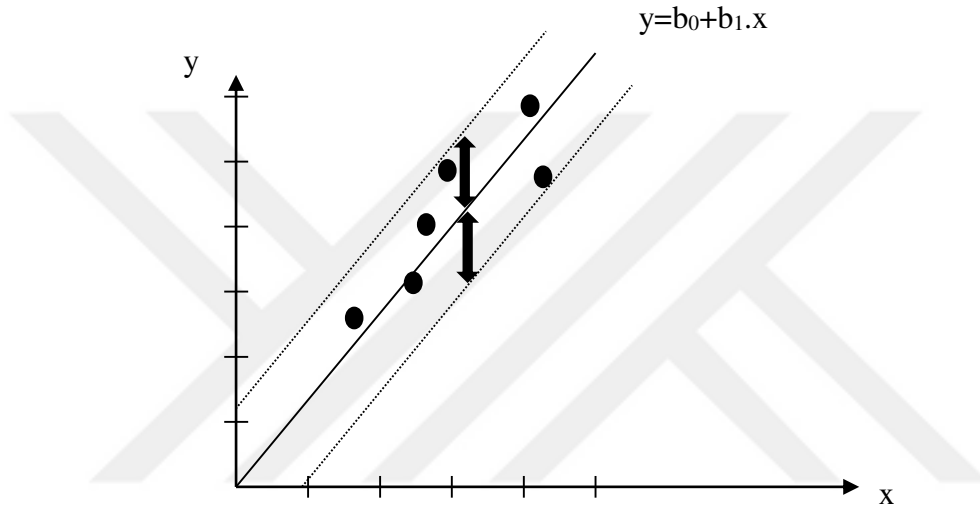
3.3 REGRESYON ANALİZİ

Regresyon analizi, aralarında sebep-sonuç ilişkisi bulunan iki veya daha çok değişken arasındaki ilişkiyi inceleyen analiz yöntemidir. Regresyon analizi ekonomi, fizik, kimya, biyoloji, sosyal bilimler, mühendislik alanları, tıp gibi bir çok alanda kullanılan bir yöntemdir. Bir değişkenin diğer değişkenlerdeki değişimlere bağlı olarak nasıl etkilendiğinin istatistik analizlerle incelenmesi çeşitli sebeplerden istenmektedir. Değişkenler arasındaki ilişki bilindiğinde, bir değişkenin değerine bakılarak diğer değişken tahmin edilebileceği gibi, etki eden faktörler kontrol altına alınabilirse, ilgili değişkenlerin değerleri optimum düzeye gelebilir. İstatistiğin bir çok uygulamasında, bir grup değişkenler arasındaki ilişkinin değerlendirilebilmesi için örnek verileri kullanılarak, değişkenler arasındaki ilişkinin modellenmesi gerekmektedir. Bunun sonucunda elde edilen model sayesinde, bağımlı değişken olarak seçilen değişkenin daha sonraki herhangi bir değeri tahmin edilebilir. Veriler

arasındaki ilişkiyi tanımlayan en uygun ve güvenilir modelin bulunmasını sağlayan istatistiksel tekniğe regresyon analizi denir [27].

3.3.1 Basit Lineer Regresyon Analizi

Basit lineer regresyon analizi, iki değişken arasındaki $y=\beta_0+\beta_1.x$ biçimindeki doğrusal ilişkiyi $y=b_0+b_1.x$ şeklinde tahmin etmek için kullanılan bir metoddur. Regresyon analizi sonucunda bulunan b_0 ve b_1 değerleri β_0 ve β_1 değerlerinin tahmin edilmiş değerleridir[23].



Şekil 3.1 x ve y değişkenleri arasındaki doğrusal regresyon.

Lineer doğrusal regresyon denkleminin formülü:

$$y=b_0+b_1x \quad (3.5)$$

şeklinde olup y bağımlı değişken iken x bağımsız değişkendir. Aynı zamanda b_0 ve b_1 ise regresyon katsayılarıdır. Reel değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki farkların karelerinin toplamını minimum yapan doğruya en küçük kareler doğrusu denir.

Denklemdaki değişkenler arasındaki bağlantıyı X_i ve Y_i ölçülen değer olmak üzere “en küçük kareler” metoduyla irdeler isek;

$$b_0 = \frac{\sum X_i^2 \sum Y_i - \sum X_i \sum X_i Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (3.6)$$

$$b_1 = \frac{\sum X_i^2 \sum Y_i - \sum X_i \sum X_i Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (3.7)$$

denklemleri elde edilir. Bulunan b_0 ve b_1 değerleri vasıtasıyla x ve y değerleri hesaplanabilir.

Regresyon katsayılarıyla elde edilen en ideal ve güvenilir doğrunun standart hatası (SH) için aşağıdaki denklemler kullanılır [22].

$$Y_{ij} = b_0 + b_1 X_i \quad (3.8)$$

$$S_r = \sum (Y_i - Y_{ii})^2 \quad (3.9)$$

$$SH = \pm \sqrt{S_r / (n - 2)} \quad (3.10)$$

Denklemlerde; Y_i bağlı değişkenleri, Y_{ii} tanımlı fonksiyonları, n ise veri sayısını ifade etmektedir. Oluşan doğrunun güvenilirliği korelasyon katsayısının karesi (R^2), olan determinasyon katsayısı bağlı değişkenin bağımsız değişkenin değişiminden kaynaklanan yüzdelik değişimi göstermektedir. Determinasyon katsayısı denklemin anlamlılığının bir göstergesi olup değeri 1'e yaklaştıkça anlamlılığı ve güvenilirliği artar[22].

$$R^2 = (S_t - S_r) / S_t \quad (3.11)$$

3.3.2 Çoklu Lineer Regresyon Analizi

Herhangi bir bağımlı değişkeni yani sonucu tek bir bağımsız değişken ya da bir sebeple açıklamak bazen mümkün olmayabilir. Birden fazla bağımsız değişkenin bir bağımlı değişkeni etkileyebildikleri durumda “Çoklu Regresyon Analizi”nden bahsedilmiş olunur [28].

Çoklu Regresyon Analizi daha fazla değişkenin birlikte analizine olanak vermesi sebebiyle daha güvenilir neticeler vermektedir.

$$y=b_0+b_1x+b_2x_2+b_3x_3+.....+b_nx_n \quad (3.12)$$

b_n sayısı kadar regresyon katsayısı içeren bu denklemin analizinde de “en küçük kareler” metodu kullanılabilir. Basit lineer regresyon denklemi herhangi bir düzlemi ifade ederken çoklu lineer regresyon denklemi herhangi bir düz yüzeyi ifade etmektedir. Çoklu lineer regresyon analizinde standart hata aşağıdaki formülle bulunur[22].

$$SH=\pm\sqrt{Sr/(n - (m + 1))} \quad (3.13)$$

Formülde n veri sayısını, m sayısı bağımsız değişken sayısını ifade etmektedir. Çoklu lineer regresyonda R sayısı basit lineer regresyona nazaran pozitifdir [29].

3.3.3 Lineer Olmayan Regresyon Analizi

Doğrusal regresyon çözümlemesi, modelde yer alan bağımsız değişkenlerin herhangi bir ölçüm hatası içermediği varsayımı altında çözümleme yapmaktadır. Lineer olmayan regresyon ise bu varsayımın sağlanmadığı durumlarda kullanılabilecek bir regresyon tekniğidir. Bağımsız değişken(ler)’in de hata içerdiği durumlarda, uygun model parametrelerini tahmin etmek için benimsenebilecek bir yol, değişkenleri sırası ile bağımlı ve bağımsız olarak ele almak ve elde edilen iki regresyon denklemini beraber dikkate alan yeni bir model belirlemek olabilir [30].

Lineer olmayan regresyon analizi sonucunda aşağıdaki türde denklemler elde edilecektir.

$$y(W_{opt}, \gamma_{kmax}) = 10^{(alogE+blogLL+clogPL+dlogPI+elogG+flogS+glogID+h)} \quad (3.14)$$

$$y(W_{opt}, \gamma_{kmax}) = e^{(alnE+blnLL+clnPL+dlnPI+elnG+flnS+glnID+h)} \quad (3.15)$$

$$y(W_{opt}, \gamma_{kmax}) = alogE+blogLL+clogPL+dlogPI+elogG+flogS+glogID+h \quad (3.16)$$

Tez çalışmasında veri setinin basit, çoklu ve lineer olmayan regresyon analizleri Rgui ve Excel programları vasıtasıyla yapılmıştır.



BÖLÜM 4

VERİLERİN İSTATİSTİKİ ANALİZİ

4.1 VERİLER VE METODLAR

Bu bölümde, Ankara ve İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarlarında, Van Gölü çevresinde ve ülkemizin çeşitli bölgelerinde ki ince daneli zemin numunelerinin birtakım deneyler (elek analizi, kıvam limitleri deneyleri) sonucu elde edilen verileri ile kompaksiyonun etkili parametreleri olan optimum su muhtevası (w_{opt}) ile maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmax}), regresyon analizi vasıtasıyla tahmin edilmeye çalışılmıştır. USCS zemin sınıflandırma yöntemine göre sınıflandırılan, indeks özellikleri verilen çeşitli ince daneli zeminlerin, uygulamada standart proktor ve modifiye proktor deneyleri ile ölçülen kompaksiyon parametreleri, farklı bir örneklem üzerinden Rgui ve Excel programları vasıtasıyla tahmin edilmiştir. Söz konusu parametreler Rgui ve Excel programları vasıtasıyla regresyon analizine tabi tutulmuş ve veri setlerinde gösterilen değerler üzerinden tahminler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar anlamlı bulunurken, toplu halde çizelgeler halinde gösterilmiştir. Kullanılan veri seti; zeminlerin numune sayıları(n), sınıflarını(USCS), kompaksiyon enerjilerini (E), likit (LL) ve plastik limitlerini (PL), plastisite indislerini (PI), çakıl oranı (G), kum oranı (S), ince dane oranı (ID) ve kompaksiyon parametrelerini (w_{opt} , γ_{kmax}) içermektedir.

Çizelge 4.1’de birtakım deneylere tabi tutulmuş 55 adet ince daneli zemin numunelerinin yukarıda bahsedilen özellikleri ve standart proktor deneyi sonucu elde edilmiş optimum su muhtevası ile maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri gösterilmiştir. Yine Çizelge 4.7’de birtakım deneylere tabi tutulmuş 39 adet ince daneli zemin numunelerinin ince-kaba dane oranları, sınıfları, kıvam indisleri ve modifiye proktor deneyi sonucu elde edilmiş kompaksiyon parametreleri gösterilmiştir. USCS’ ye göre ayrı ayrı sınıflandırılan zemin numuneleri, sayıları ve sınıfları çizelge 4.2 ve 4.8’de bütün olarak verilmiştir. Veri setlerinin istatistiki parametreleri (ortalama, medyan, kartil (Q), varyans, standart sapma) çizelge 4.3 ve 4.9’da ayrı ayrı gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Regresyon analizinde kullanılan s. proktor deneyi veri seti[B1, 31’den, 32].

n	USCS	E (kJ/m ³)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	G (%)	S (%)	ID (%)	W _{opt} (%)	γ _{kmax} kN/m ³
1	CH	593,00	57,00	24,00	33,00	0,00	2,00	98,00	22,00	16,50
2	ML	593,00	45,00	28,00	17,00	14,00	33,00	53,00	17,00	16,90
3	CL	593,00	32,00	16,00	16,00	4,00	41,00	55,00	16,00	17,40
4	CL	593,00	48,00	22,00	26,00	5,00	3,00	92,00	22,00	15,80
5	CL	593,00	32,00	12,00	20,00	1,00	48,00	51,00	15,00	17,80
6	CL	593,00	42,00	22,00	20,00	1,00	21,00	78,00	21,00	15,50
7	CL	593,00	35,00	17,00	18,00	2,00	48,00	50,00	13,00	18,00
8	CL	593,00	42,00	15,00	27,00	38,00	9,00	53,00	17,00	17,00
9	CL	593,00	30,00	12,00	18,00	8,00	40,00	52,00	13,00	18,70
10	CL	593,00	37,00	18,00	19,00	0,00	27,00	73,00	19,00	17,00
11	CL	593,00	40,00	18,00	22,00	5,00	30,00	65,00	17,00	17,40
12	CL	593,00	41,00	21,00	20,00	2,00	31,00	67,00	18,50	16,40
13	CL	593,00	31,00	15,00	16,00	4,00	40,00	56,00	14,00	18,20
14	CL	593,00	33,00	16,00	17,00	10,00	49,00	41,00	15,00	18,50
15	CL	593,00	36,00	16,00	20,00	9,00	27,00	64,00	20,00	16,90
16	CL	593,00	47,00	22,00	25,00	18,00	20,00	62,00	23,00	16,30
17	CL	593,00	43,00	18,00	25,00	10,00	34,00	56,00	18,00	17,10
18	CL	593,00	38,00	20,00	18,00	1,00	41,00	58,00	20,00	15,90
19	CL	593,00	45,00	26,00	19,00	1,00	27,00	72,00	22,00	15,85
20	CL	593,00	44,00	23,00	21,00	1,00	45,00	54,00	20,00	16,20
21	CL	593,00	46,00	20,00	26,00	3,00	29,00	68,00	17,00	17,00
22	CL	593,00	41,00	24,00	17,00	1,00	9,00	90,00	20,00	16,20
23	CL	593,00	43,00	24,00	19,00	0,00	8,00	92,00	20,00	16,20
24	CL	593,00	28,00	16,00	12,00	15,00	30,00	55,00	15,00	18,80
25	CL	593,00	33,00	19,00	14,00	4,00	24,00	72,00	17,50	17,20
26	CL	593,00	45,00	22,00	23,00	0,00	21,00	79,00	20,00	16,60
27	CL	593,00	36,00	20,00	16,00	1,00	29,00	70,00	22,00	15,30
28	CL	593,00	36,00	16,00	20,00	12,00	16,00	82,00	14,00	18,50
29	CH	593,00	51,00	20,00	31,00	0,00	1,00	99,00	23,00	15,30
30	CH	593,00	69,00	26,00	43,00	8,00	18,00	74,00	20,00	15,80
31	CH	593,00	54,00	27,00	27,00	41,00	7,00	52,00	26,00	14,60
32	CH	593,00	63,00	23,00	40,00	12,00	11,00	77,00	23,00	16,00
33	CH	593,00	53,00	23,00	30,00	6,00	6,00	88,00	20,00	15,90
34	CH	593,00	51,00	20,00	31,00	0,00	5,00	95,00	23,00	15,00
35	CH	593,00	53,00	28,00	25,00	5,00	18,00	77,00	27,00	14,40
36	MH	593,00	62,00	35,00	27,00	1,00	15,00	84,00	25,00	14,20
37	MH	593,00	52,00	31,00	21,00	2,00	31,00	67,00	22,00	16,10
38	CH	593,00	51,00	21,00	30,00	4,00	34,00	62,00	19,00	16,20
39	CH	593,00	59,00	23,00	36,00	2,00	22,00	76,00	24,00	15,20
40	CH	593,00	54,00	26,00	28,00	4,00	31,00	65,00	22,00	15,20
41	CH	593,00	67,00	28,00	39,00	0,00	23,00	77,00	25,00	14,90
42	CH	593,00	74,00	28,00	46,00	1,00	15,00	84,00	26,00	15,10
43	CL	593,00	46,95	22,01	24,94	0,00	10,70	89,30	19,70	16,19
44	CL	593,00	29,10	20,75	8,35	0,00	18,29	81,71	16,90	17,26
45	CL	593,00	28,90	20,79	8,11	0,00	14,44	85,56	17,00	17,70
46	CL	593,00	27,30	19,97	7,33	0,00	14,90	85,10	16,50	17,66
47	CL	593,00	29,00	20,65	8,35	0,00	3,58	96,42	18,20	17,07
48	CL	593,00	34,30	21,49	12,81	0,00	13,94	86,06	17,90	16,77
49	CL	593,00	30,80	20,61	10,19	0,00	9,18	90,82	17,70	17,26
50	CL	593,00	32,60	19,59	13,01	0,00	14,07	85,93	17,00	17,26
51	CL	593,00	37,98	23,01	14,97	0,00	13,58	86,42	20,00	15,99
52	CL	593,00	42,40	21,60	20,80	0,00	15,13	84,87	19,10	16,58
53	ML	593,00	37,25	28,98	8,27	0,00	19,94	81,06	23,90	14,62
54	CH	593,00	61,40	28,41	32,99	0,00	7,98	92,02	24,50	15,13
55	CL	593,00	30,70	22,47	8,23	0,00	14,85	85,15	20,10	16,28

Çizelge 4.2 Regresyon analizinde kullanılan (S. Proktor) zeminlerin sınıf ve sayıları.

Zemin sınıfı	Veri sayısı
CL	37
CH	14
MH	2
ML	2
Σ	55

Çizelge 4.3 Zemin numunelerinin (S. Proktor) istatistiksel parametreleri.

	E (kJ/m ³)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	G (%)	S (%)	ID (%)	W _{opt} (%)	γ_{kmax} kN/m ³
Min.	593,00	27,30	12,00	7,33	0,00	1,00	41,00	13,00	14,20
1.Q.	593,00	33,65	19,29	16,00	0,00	12,29	62,00	17,00	15,80
Med.	593,00	42,00	21,49	20,00	1,00	19,94	77,00	20,00	16,30
Mean (Ort.)	593,00	43,41	21,66	21,75	4,65	21,63	73,92	19,66	16,45
3.Q.	593,00	51,00	24,00	27,00	5,00	30,50	85,75	22,00	17,23
Max.	593,00	74,00	35,00	46,00	41,00	49,00	99,00	27,00	18,80
Std. Sap.	0	11,44	4,61	9,04	8,09	12,78	14,93	3,42	1,12
Var.	0	130,8	21,22	81,68	65,46	163,2	222,7	11,68	1,26

Bağımsız değişkenlerin (E, LL, PL, PI, G, S, ID), bağlı değişkenlerle (W_{opt}, γ_{kmax}), regresyon ve korelasyon analizleri bilgisayar programları vasıtasıyla araştırılmış ve aşağıdaki denklemler formatında kompaksiyon parametreleri tahmin edilmeye çalışılmıştır.

$$y(W_{opt}, \gamma_{kmax}) = a + bE + cLL + dPL + ePI + fG + gS + hID \quad (4.1)$$

$$y(W_{opt}, \gamma_{kmax}) = 10^{(alogE + blogLL + clogPL + dlogPI + elogG + flogS + glogID + h)} \quad (4.2)$$

$$y(W_{opt}, \gamma_{kmax}) = e^{(alnE + blnLL + clnPL + dlnPI + elnG + flnS + glnID + h)} \quad (4.3)$$

$$y(W_{opt}, \gamma_{kmax}) = alogE + blogLL + clogPL + dlogPI + elogG + flogS + glogID + h \quad (4.4)$$

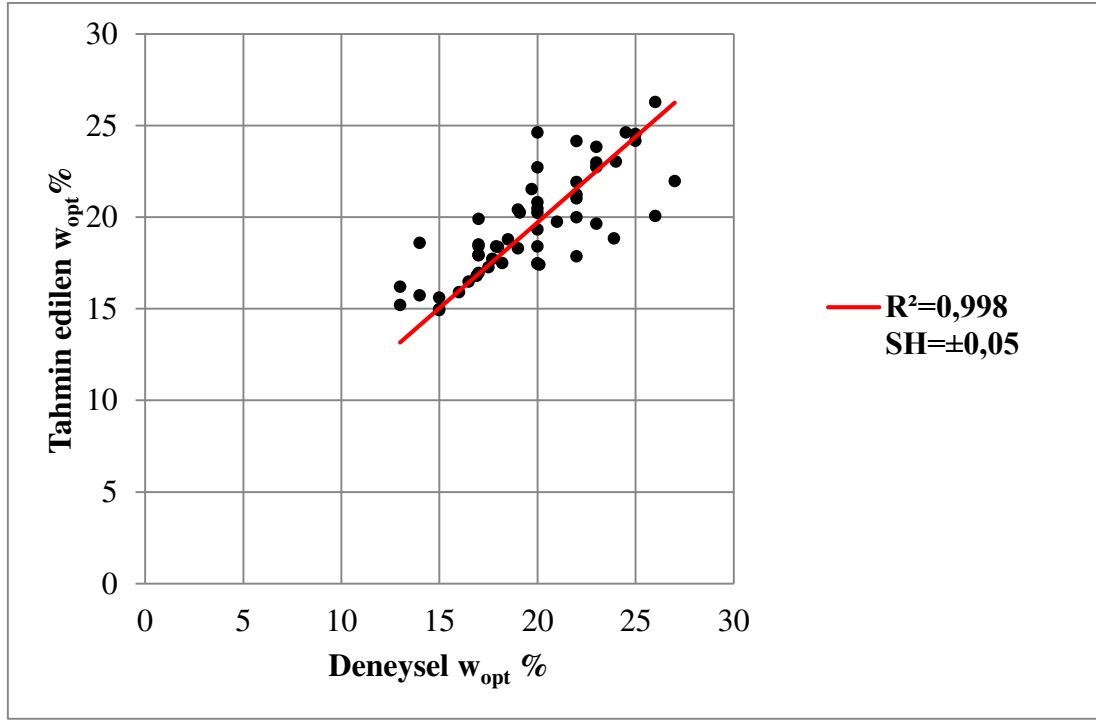
Elde edilen tahminlerde regresyon katsayıları(a, b, c, d, e, f, g, h), sayılarla belirtilmiş olup, determinasyon katsayısı (R^2) ve tahmin edilen denklemin standart hatası (SH), elde edilen denklemlerin güvenilirliği açısından incelenmiştir. Bir önceki bölümden hatırlanacağı üzere korelasyon katsayısının (R) 1'ya yaklaşması, standart hatanın da 0'a yaklaşması denklemin güvenilirliğini artırmaktadır. Çizelge 4.4' de w_{opt} 'a Çizelge 4.5'de γ_{kmax} 'a ait denklemlerin determinasyon katsayıları (R^2) ve standart hataları (SH) Rgui ve Excel programı ile tespit edilmiş ve gösterilmiştir. Her bir denklem %5 anlamlılık düzeyine göre incelenmiş, yapılan analizler sonucunda, kompaksiyon parametreleri ile bağımsız değişkenler arasında anlamlı bir ilişki olduğu görülmüştür. Anlamlılık açısından en iyi denklem maksimum R^2 veya R'ye, minimum SH'ye sahip olmalıdır.

Çizelge 4.4 Regresyon analizi sonucu w_{opt} için tahmin edilen modeller.

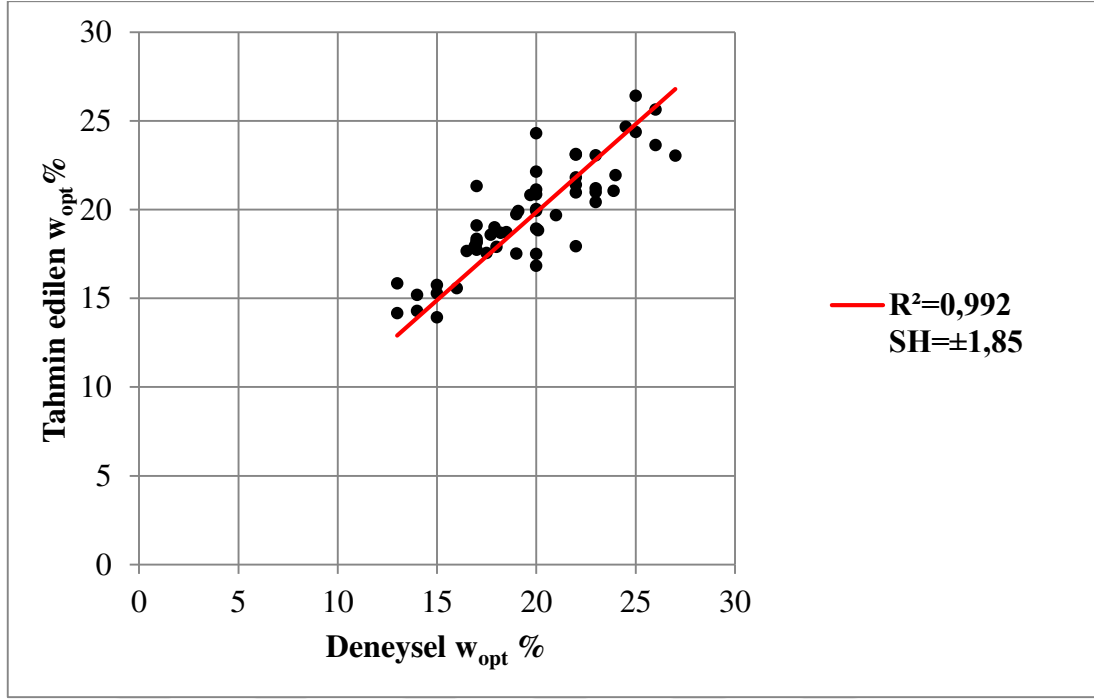
Model No	Denklem	R^2	SH ± %
Mod. 1	$w_{opt} = 0,068E+0,117LL+0,312PL-0,309G-0,369S-0,315ID$	0,992	1,85
Mod. 2	$w_{opt} = 0,119LL+0,338PL+0,081G+0,034S+0,081ID$	0,991	1,91
Mod. 3	$w_{opt} = 0,144LL+0,388PL+0,065ID$	0,990	2,05
Mod. 4	$w_{opt} = 0,14E-0,607G-0,733S-0,604ID$	0,978	3,02
Mod. 5	$w_{opt} = 0,011E+0,123LL+0,369PL$	0,991	1,94
Mod. 6	$w_{opt} = 0,539PL+0,117G+0,038S+0,089ID$	0,989	2,15
Mod. 7	$w_{opt} = 0,206LL+0,087G+0,053S+0,123ID$	0,989	2,20
Mod. 8	$w_{opt} = 0,011E+0,207LL+0,0571ID$	0,988	2,17
Mod. 9	$w_{opt} = 10^{(0,018\log(E)+0,471\log(LL)+0,252\log(ID))}$	0,998	0,05
Mod.10	$w_{opt} = -42,896\log(LL)+44,003\log(PL)+23,896\log(PI)$	0,988	2,16

Çizelge 4.4'de w_{opt} için regresyon analizi yapılmış oluşturulan 10 adet denklem toplu şekilde verilmiştir. Elde edilen denklemler determinasyon katsayısı bakımından incelendiğinde maksimum R^2 'nin 0,998 değerini, minimum R^2 'nin ise 0,978 değerini aldığı görülmüştür. Model 9 maksimum R^2 'ye sahip iken Model 4'ün ise minimum R^2 'ye sahip olduğu anlaşılmıştır. Oluşturulan modeller %5 anlamlılık düzeyine göre oluşturulmuş olup, R^2 ve SH

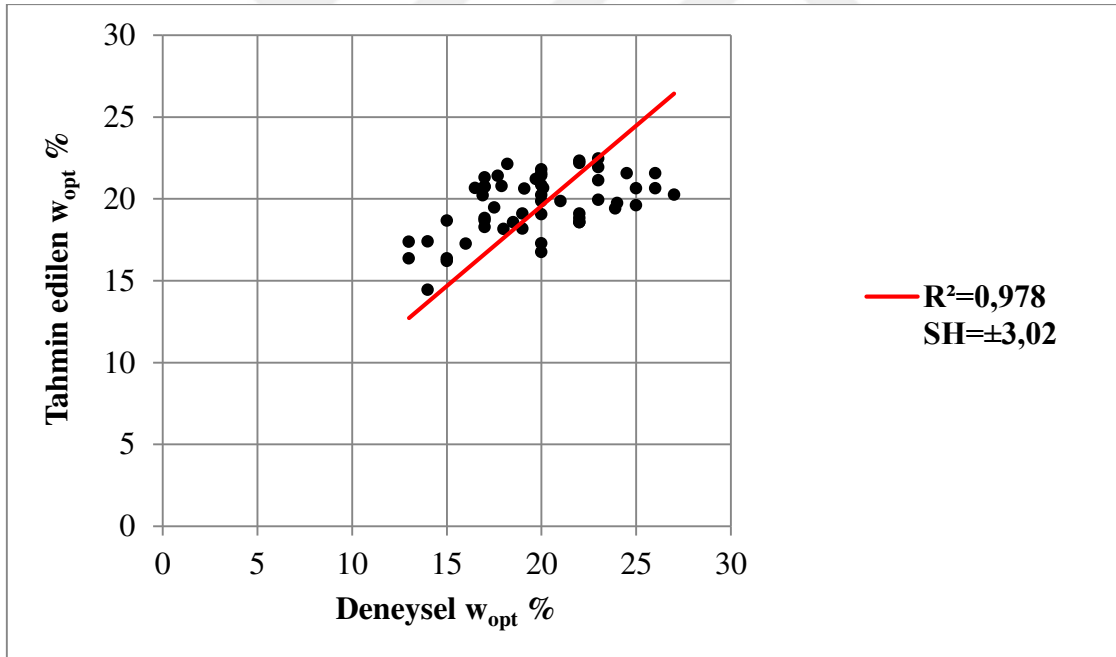
değerleri; değişkenler arasında anlamlı ilişkinin varlığını göstermektedir. Denklemler standart hata bakımından değerlendirildiğinde maksimum değer 3.02 iken, minimum değer 0.05 olduğu görülmektedir. Model 9 en düşük standart hataya sahip iken, Model 4'ün en yüksek standart hataya sahip olduğu anlaşılmıştır. Her iki kriteri göz önüne aldığımızda tüm modellerin anlamlılığının yüksek olduğu aşikardır. En yüksek R^2 'ye sahip modeller; Model 9, Model 1 ve en düşük R^2 'ye sahip Model 4'e ait tahminler ile deneysel değerlerin karşılaştırıldığı grafikler Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3' de sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Model 9 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.



Şekil 4.2 Model 1 için deneyisel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.

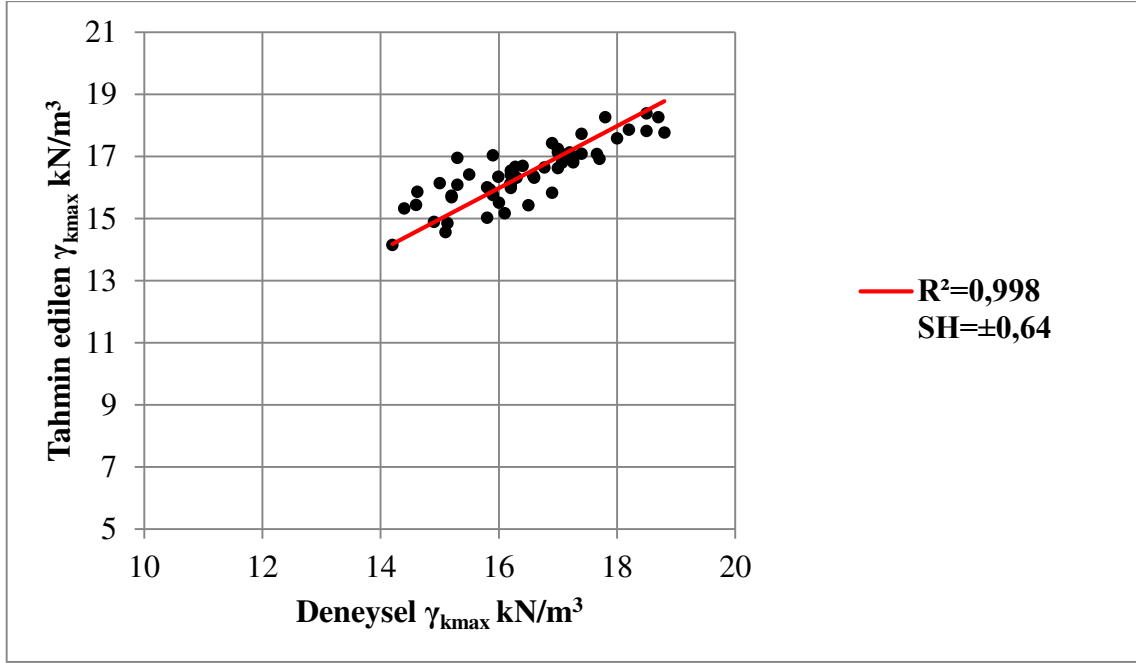


Şekil 4.3 Model 4 için deneyisel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.

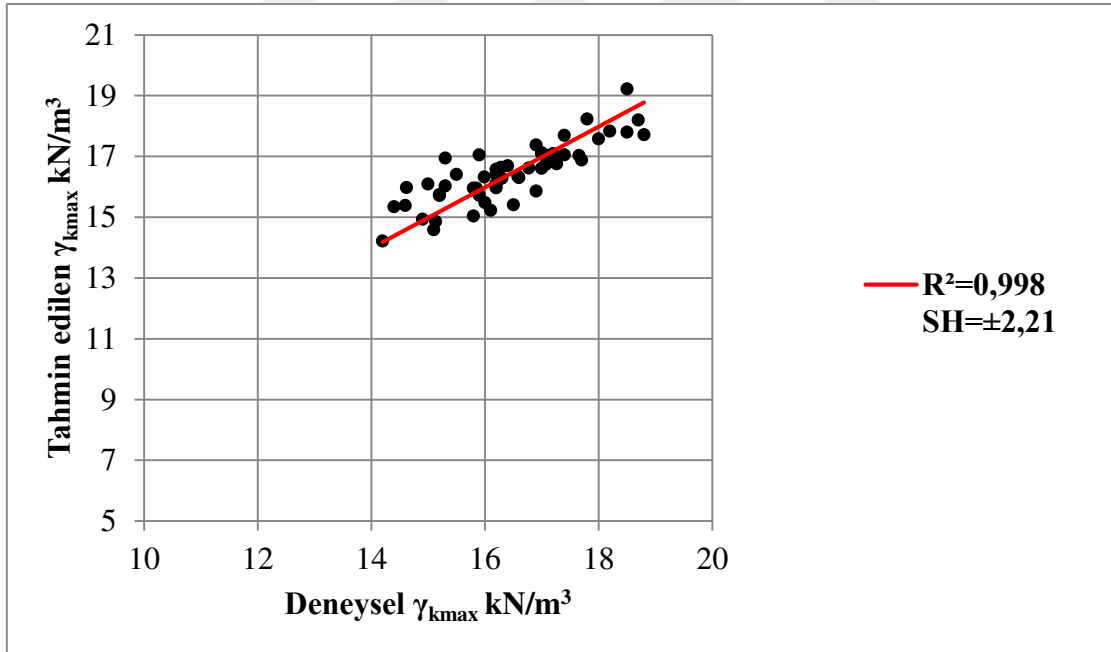
Çizelge 4.5 Regresyon analizi sonucu γ_{kmax} için tahmin edilen modeller.

Model No	Denklem	R ²	SH ± kN/m ³
Mod. 1	$\gamma_{kmax} = 0,016E-0,034LL-0,116PL+0,112G+0,12S+0,107ID$	0,998	0,64
Mod. 2	$\gamma_{kmax} = -0,033LL-0,109PL+0,202G+0,213S+0,199ID$	0,998	2,21
Mod. 3	$\gamma_{kmax} = 0,019LL-0,091PL+0,215S+0,174ID$	0,989	1,74
Mod. 4	$\gamma_{kmax} = 10^{(0,158\log(LL)-0,338\log(PL)+0,152\log(S)+0,665\log(ID))}$	0,998	0,05
Mod. 5	$\gamma_{kmax} = -3,147\log(LL)+2,908\log(S)+9,66\log(ID)$	0,994	1,23
Mod. 6	$\gamma_{kmax} = 0,165G+0,193S+0,156ID$	0,996	1,01
Mod. 7	$\gamma_{kmax} = e^{(0,248\ln(LL)-0,238\ln(PL)+0,604\ln(ID))}$	0,996	0,17
Mod. 8	$\gamma_{kmax} = 12,293\log(E) - 13,704\log(w_{opt})$	0,998	0,38

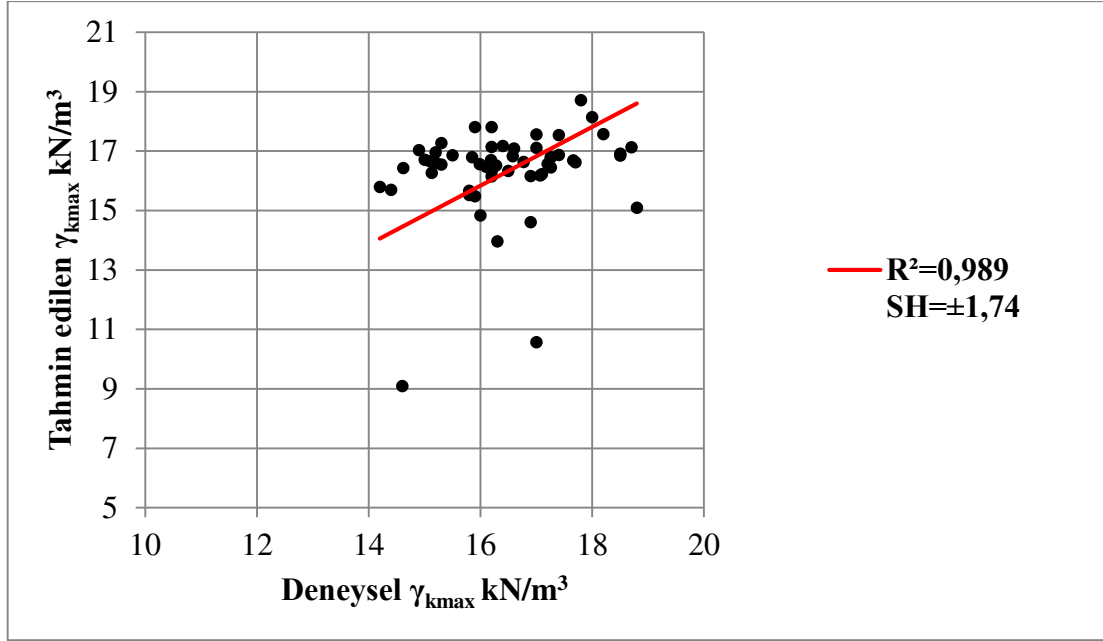
Çizelge 4.5’de γ_{kmax} için regresyon analizi yapılmış, oluşturulan 8 adet denklem toplu şekilde verilmiştir. Elde edilen denklemler determinasyon katsayısı bakımından incelendiğinde maksimum R²’nin 0,998 değerini, minimum R²’nin ise 0,989 değerini aldığı görülmüştür. Model 1, Model 2, Model 4 ve Model 8 maksimum R²’ye sahip iken Model 3’ ün ise minimum R²’ye sahip olduğu anlaşılmıştır. Oluşturulan modeller %5 anlamlılık düzeyine göre oluşturulmuş olup R² ve SH değerleri değişkenler arasında anlamlı ilişkinin varlığını göstermektedir. Denklemler standart hata bakımından değerlendirildiğinde maksimum değer 2,21 iken, minimum değer 0,05 olduğu görülmektedir. Model 4 en düşük standart hataya sahip iken, Model 2’nin en yüksek standart hataya sahip olduğu anlaşılmıştır. Her iki kriteri göz önüne aldığımızda tüm modellerin anlamlılığının yüksek olduğu aşıkardır. En yüksek R²’ye sahip modellerden Model 1, Model 2 ve en düşük R²’ye sahip Model 3’e ait tahminler ile deneysel değerlerin karşılaştırıldığı grafikler Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Model 1 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.



Şekil 4.5 Model 2 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.



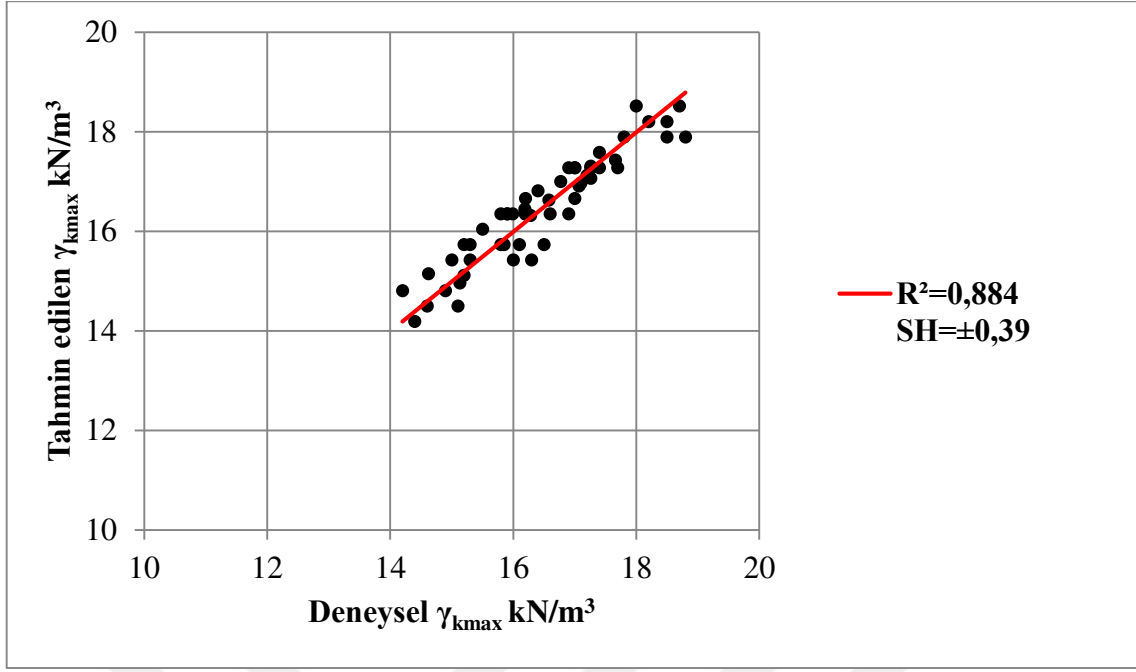
Şekil 4.6 Model 3 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.

Kompaksiyon parametreleri(S. Proktor) arasında doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri yapılmış, ve elde edilen denklemler Çizelge 4.6'da toplu şekilde gösterilmiştir.

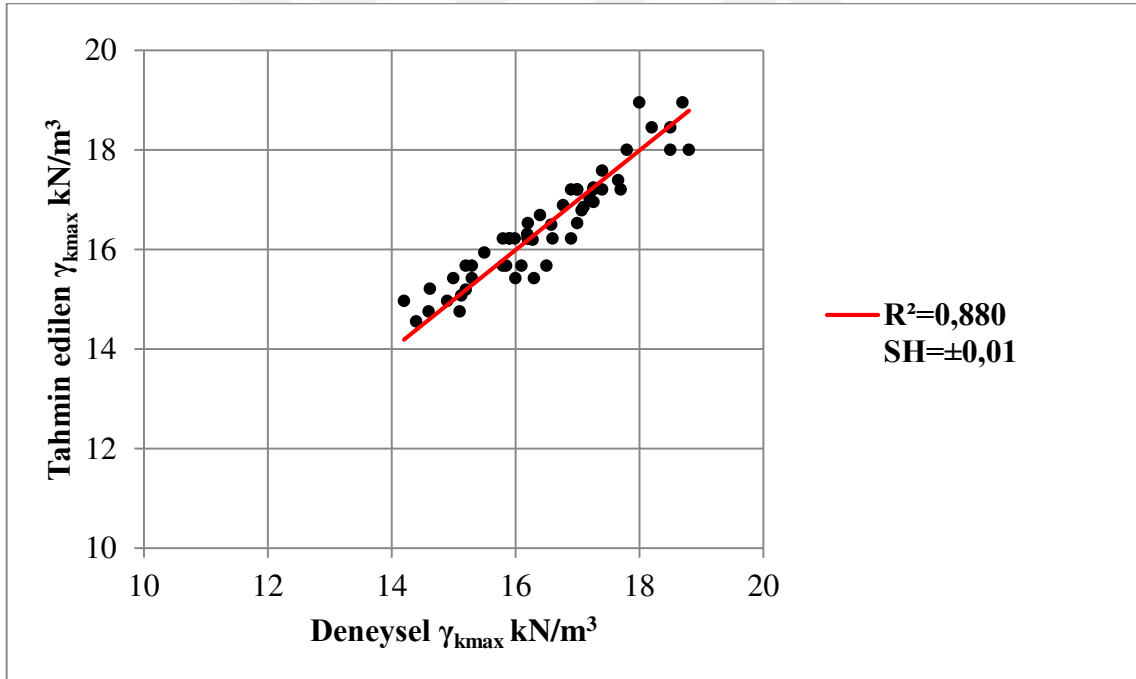
Çizelge 4.6 Regresyon analizi sonucu γ_{kmax} ile w_{opt} için tahmin edilen modeller.

Model No	Denklem	R ²	SH ± kN/m ³
Mod. 1	$\gamma_{kmax} = 22,528 - 0,309w_{opt}$	0,884	0,39
Mod. 2	$\gamma_{kmax} = 10^{(-0,361\log(w_{opt})+1,679)}$	0,880	0,01
Mod. 3	$\gamma_{kmax} = e^{-0,361\ln(w_{opt})+3,868}$	0,881	0,02
Mod. 4	$\gamma_{kmax} = -13,7045\log(w_{opt})+34,09$	0,886	0,38

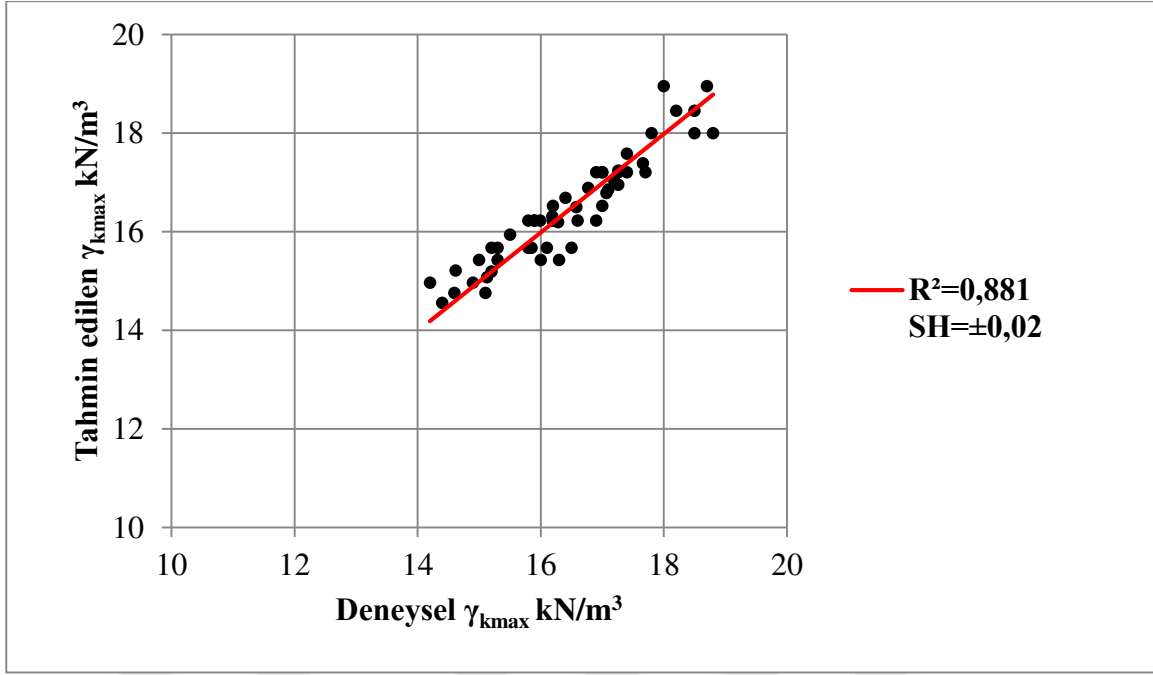
Çizelge 4.6' da görüldüğü üzere, kompaksiyon parametrelerinin kendi aralarındaki regresyon analizinden elde edilen modellerin anlamlılığından bahsetmek mümkündür. Modellerin anlamlılığı grafiksel gösterimden de anlaşılmaktadır. En yüksek R²'ye logaritmik ve doğrusal modelin sahip olduğu görülürken, en düşük R²'ye Model 2'nin sahip olduğu görülmektedir. En küçük SH'ye Model 2 sahip iken en yüksek SH değerinin Model 1'e ait olduğu anlaşılmıştır. Modellere ait grafikler Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da sırasıyla gösterilmiştir.



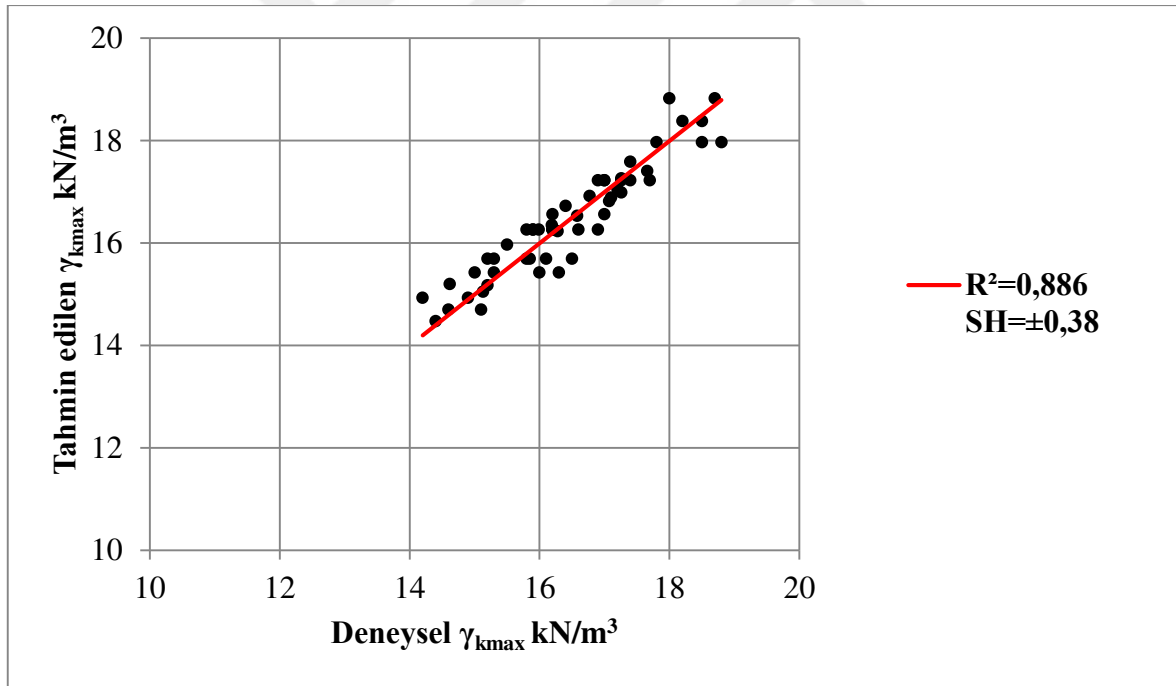
Şekil 4.7 Model 1 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.



Şekil 4.8 Model 2 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.



Şekil 4.9 Model 3 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} ’ın grafiksel karşılaştırılması.



Şekil 4.10 Model 4 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} ’ın grafiksel karşılaştırılması.

Çizelge 4.7 Regresyon analizinde kullanılan m. proktor deneyi veri seti[B2, 31'den, 32-34].

n	USCS	E (kJ/m ³)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	G (%)	S (%)	ID (%)	W _{opt} (%)	γ _{kmax} kN/m ³
1	CH	2693,00	77,00	30,00	47,00	0,00	0,00	100,00	20,50	16,80
2	ML	2693,00	42,00	30,00	12,00	0,00	10,00	90,00	20,00	16,50
3	CL	2693,00	35,00	23,00	12,00	0,00	14,00	86,00	14,00	18,60
4	CH	2693,00	66,00	29,00	37,00	0,00	8,00	100,00	15,00	18,50
5	ML	2693,00	49,30	29,80	19,50	0,00	40,00	60,00	24,00	15,10
6	CH	2693,00	69,20	26,60	42,60	0,00	46,00	54,00	16,10	16,68
7	MH	2693,00	53,70	33,40	20,30	0,00	43,00	57,00	21,90	15,30
8	MH	2693,00	52,60	30,50	22,10	0,00	39,00	61,00	19,20	16,19
9	CH	2693,00	53,10	25,00	28,10	0,00	42,00	58,00	14,50	16,38
10	CH	2693,00	57,80	29,60	28,20	0,00	44,00	56,00	18,20	16,77
11	CH	2693,00	75,00	33,10	41,90	0,00	40,00	60,00	21,00	15,99
12	CH	2693,00	57,10	24,40	32,70	0,00	37,00	63,00	18,20	15,89
13	CH	2693,00	62,00	30,00	32,00	0,00	38,00	62,00	16,00	15,70
14	CH	2693,00	54,50	25,60	28,90	0,00	40,00	60,00	19,10	16,77
15	CH	2693,00	54,00	27,50	26,50	0,00	43,00	57,00	17,50	16,97
16	CH	2693,00	51,60	21,90	29,70	0,00	46,00	54,00	15,70	16,97
17	CL	2693,00	48,80	24,30	24,50	0,00	49,00	51,00	17,20	17,46
18	MH	2693,00	55,20	32,00	23,20	0,00	22,00	78,00	16,80	17,66
19	ML	2693,00	46,50	28,00	18,50	0,00	44,00	56,00	13,00	18,64
20	CL	2693,00	41,00	21,00	20,00	2,00	31,00	67,00	14,50	17,70
21	CL	2693,00	46,00	22,00	24,00	4,00	24,00	72,00	15,00	18,10
22	CL	2693,00	46,00	20,00	26,00	16,00	22,00	62,00	15,00	17,70
23	CL	2693,00	49,00	25,00	24,00	21,00	28,00	51,00	16,00	17,70
24	CL	2693,00	42,00	23,00	19,00	16,00	33,00	51,00	16,00	17,60
25	CL	2693,00	47,00	22,00	25,00	0,00	23,00	77,00	18,00	18,50
26	CL	2693,00	47,00	23,00	24,00	0,00	21,00	79,00	18,00	18,50
27	CL	2693,00	46,95	22,01	24,94	0,00	10,70	89,30	15,60	18,05
28	CL	2693,00	29,10	20,75	8,35	0,00	18,29	81,71	13,20	18,93
29	CL	2693,00	28,90	20,79	8,11	0,00	14,44	85,56	13,50	18,54
30	CL	2693,00	27,30	19,97	7,33	0,00	14,90	85,10	13,40	18,74
31	CL	2693,00	29,00	20,65	8,35	0,00	3,58	96,42	14,80	18,44
32	CL	2693,00	34,30	21,49	12,81	0,00	13,94	86,06	14,30	18,34
33	CL	2693,00	30,80	20,61	10,19	0,00	9,18	90,82	14,20	18,64
34	CL	2693,00	32,60	19,59	13,01	0,00	14,07	85,93	13,60	18,74
35	CL	2693,00	37,98	23,01	14,97	0,00	13,58	86,42	16,30	17,36
36	CL	2693,00	42,40	21,60	20,80	0,00	15,13	84,87	15,40	17,95
37	ML	2693,00	37,25	28,98	8,27	0,00	19,94	81,06	19,30	15,79
38	CH	2693,00	61,40	28,41	32,99	0,00	7,98	92,02	20,90	16,36
39	CL	2693,00	30,70	22,47	8,23	0,00	14,85	85,15	16,80	17,36

Çizelge 4.8 Regresyon analizinde kullanılan (M.Proktor) zeminlerin sınıf ve sayıları.

Zemin sınıfı	Veri sayısı
CL	20
CH	12
MH	3
ML	4
Σ	39

Çizelge 4.9 Zemin numunelerinin (M.Proktor) istatistiksel parametreleri.

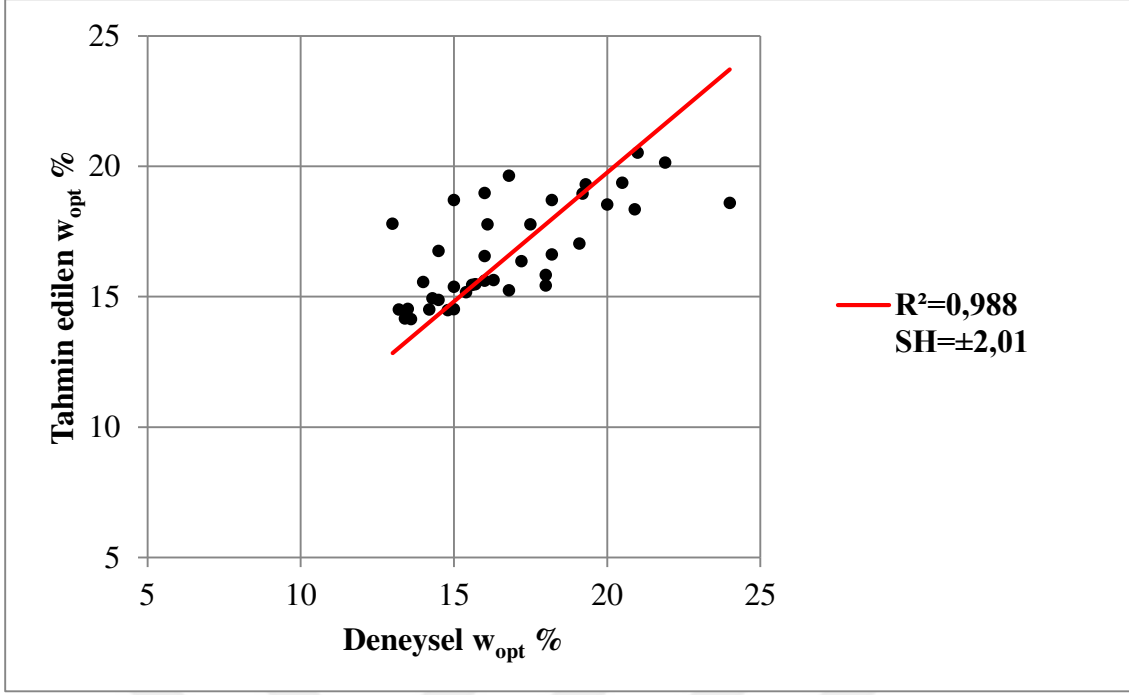
	E (kJ/m^3)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	G (%)	S (%)	ID (%)	w_{opt} (%)	γ_{kmax} kN/m^3
Min.	2693,0	27,30	19,59	7,33	0,00	0,00	51,00	13,00	15,10
1.Q.	2693,0	37,61	21,75	12,91	0,00	14,03	59,00	14,65	16,59
Med.	2693,0	47,00	24,30	23,20	0,00	22,00	77,00	16,00	17,60
Mean (Ort.)	2693,0	47,36	25,13	22,23	1,51	25,37	73,14	16,71	17,38
3.Q.	2693,0	54,25	28,99	28,15	0,00	40,00	85,75	22,00	17,23
Max.	2693,0	74,00	35,00	46,00	41,00	49,00	100,0	24,00	18,93
Std. Sap.	0,00	12,60	4,08	10,14	4,76	14,41	15,41	2,65	1,07
Var.	0,00	158,7	16,64	102,8	22,66	207,7	237,3	7,00	1,15

Bağımsız değişkenlerin (E, LL, PL, PI, G, S, ID), bağımlı değişkenler olan kompaksiyon parametreleri (w_{opt} , γ_{kmax}), ile aralarında regresyon analizi yapılmış, 12 adet anlamlı denklem elde edilmiştir. Elde edilen modeller Çizelge 4.10'da gösterilmiştir.

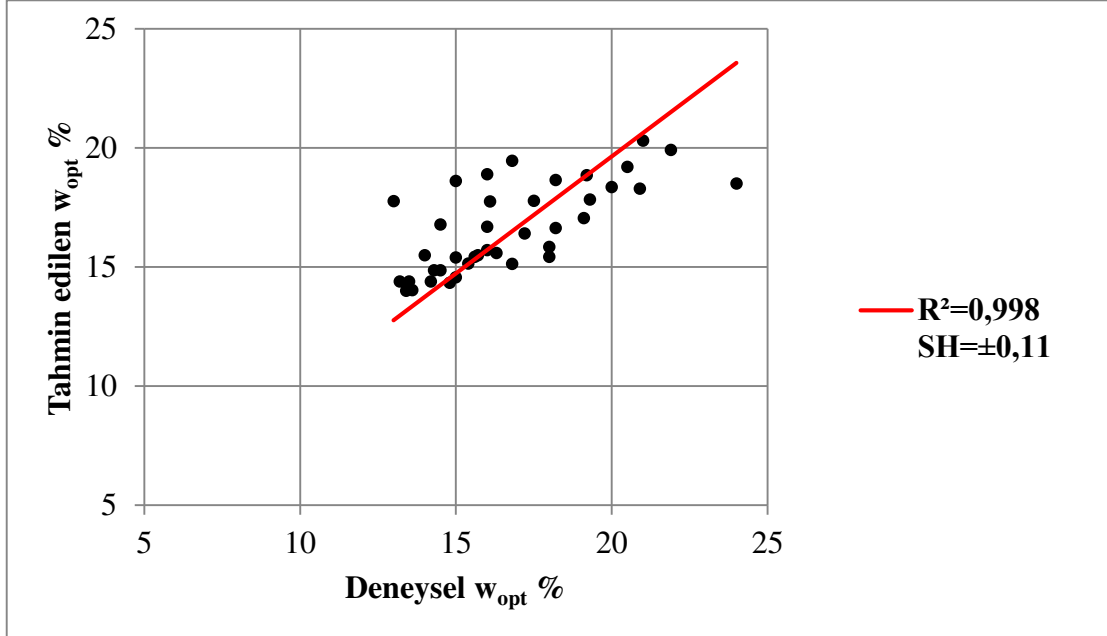
Çizelge 4.10 Regresyon analizi sonucu w_{opt} ve γ_{kmax} için tahmin edilen modeller.

Model No	Denklem	R^2	SH $\pm$ % /kN/m ³
Mod. 1	$w_{opt} = -0,046E+0,424LL-0,401PI+1,299G+1,303S+1,304ID$	0,988	2,01
Mod. 2	$w_{opt} = 0,016LL+0,425PL+0,049G+0,051S+0,053ID$	0,987	1,99
Mod. 3	$w_{opt} = 0,003LL+0,655PL$	0,985	2,09
Mod. 4	$w_{opt} = -39,65\log(LL)+42,802\log(PL)+17,64\log(PI)$	0,986	2,07
Mod. 5	$w_{opt} = e^{(0,074\ln(LL)+0,588\ln(PL)+0,079\ln(E))}$	0,998	0,11
Mod. 6	$\gamma_{kmax} = 0,06E -0,137LL+0,124PI-1,398G-1,422S-1,399ID$	0,998	0,71
Mod. 7	$\gamma_{kmax} = -0,003LL-0,155PL+0,219G+0,198S+0,219ID$	0,998	0,75
Mod. 8	$\gamma_{kmax} = 21,83\log(LL)-16,28\log(PL)-8,65\log(PI)+8,107\log(ID)$	0,998	1,06
Mod. 9	$\gamma_{kmax} = 0,007E -0,004LL-0,161PL+0,019ID$	0,998	0,73
Mod. 10	$\gamma_{kmax} = 0,904\ln(LL)-1,514\ln(PL)+4,396\ln(ID)$	0,998	1,07
Mod. 11	$\gamma_{kmax} = 9,594\log(E)-12,751\log(w_{opt})$	0,998	0,67
Mod. 12	$\gamma_{kmax} = 22,715-0,319w_{opt}$	0,788	0,68

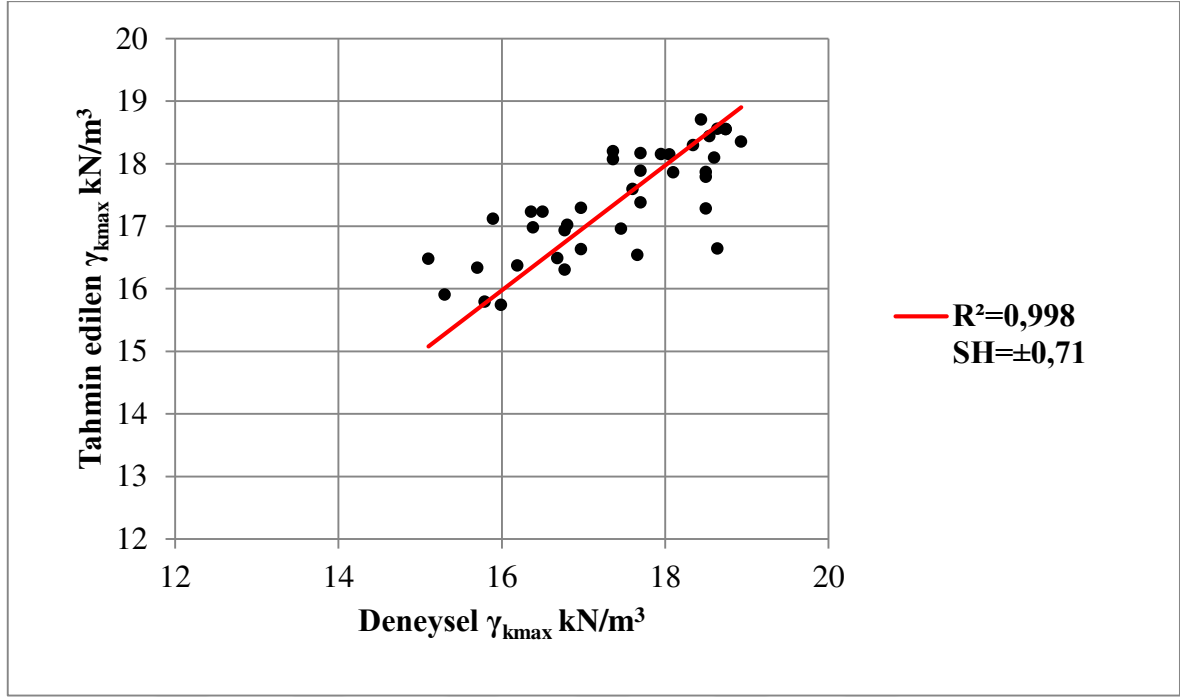
Çizelge 4.10’da görüldüğü üzere doğrusal ve doğrusal olmayan şeklinde oluşturulan denklemler determinasyon katsayısı (R^2) ve standart hata (SH) türünden incelendiğinde modellerin anlamlılığından bahsetmek mümkündür. Söz konusu anlamlı modellerden Model 1, Model 5, Model 6, Model 9, Model 10, Model 11 ve Model 12’ye ait tahminler ile deneysel değerlerin karşılaştırıldığı grafikler sırasıyla Şekil 4.11-4.16 ve Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



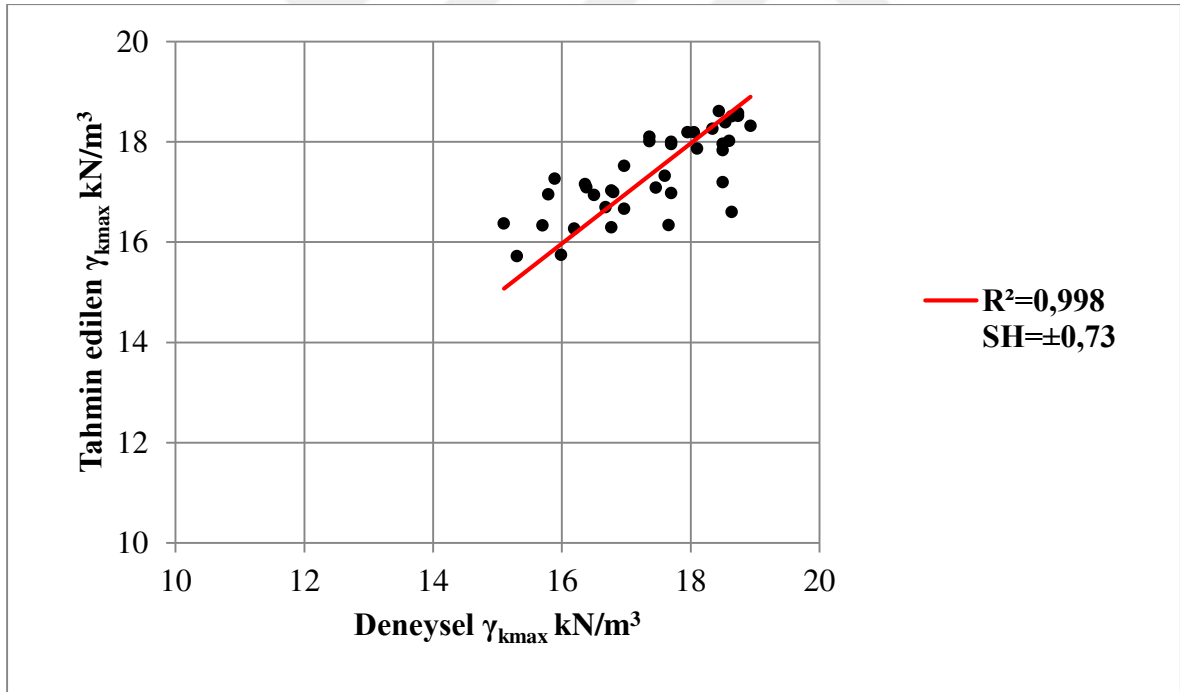
Şekil 4.11 Model 1 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.



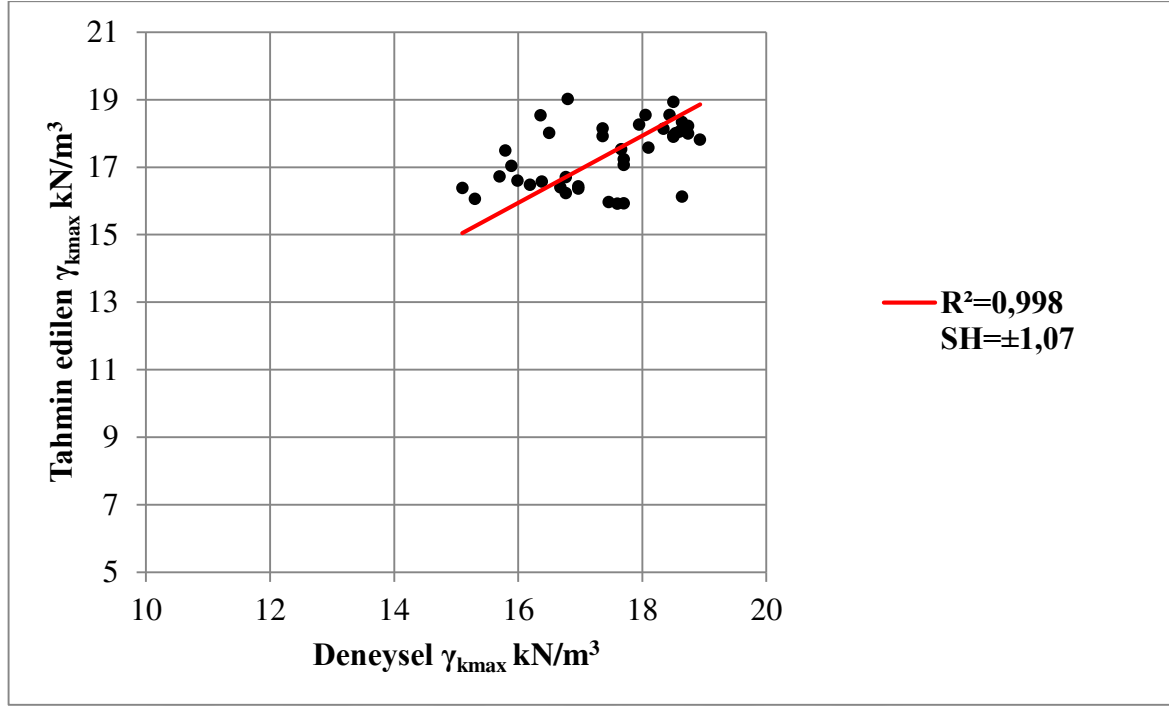
Şekil 4.12 Model 5 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.



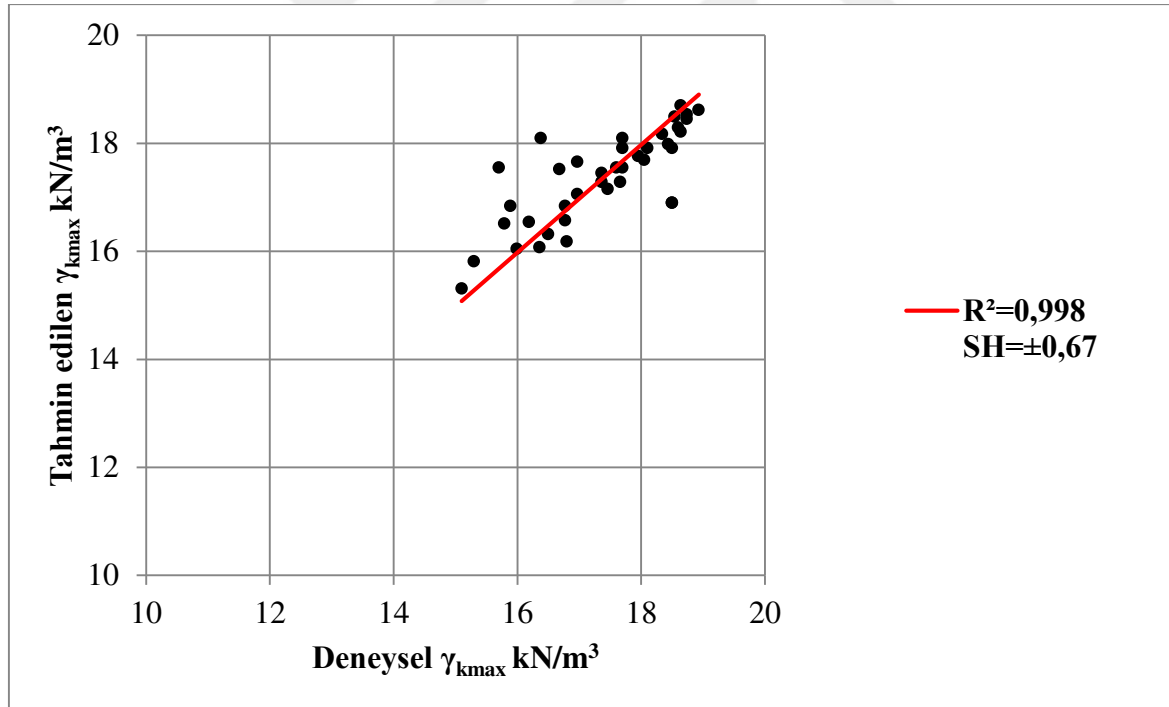
Şekil 4.13 Model 6 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.



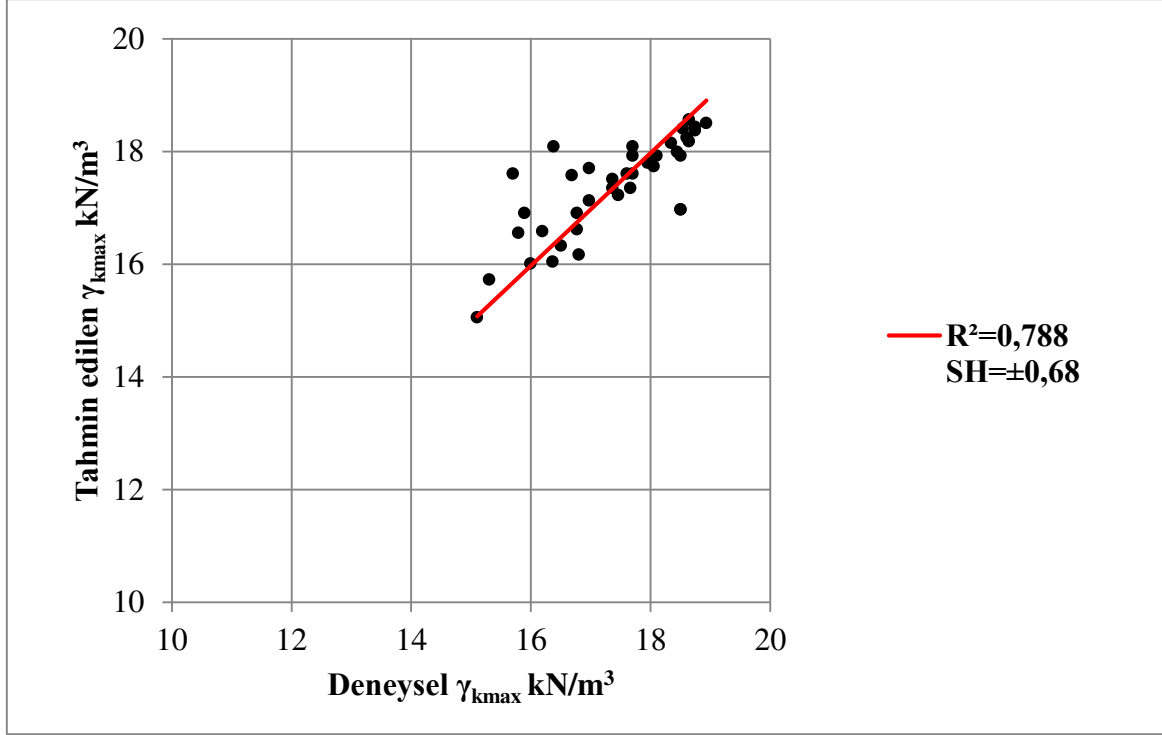
Şekil 4.14 Model 9 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.



Şekil 4.15 Model 10 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.



Şekil 4.16 Model 11 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.



Şekil 4.17 Model 12 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.

4.2 KOMPAKSİYON PARAMETRELERİNİN TAHMİNİ ÜZERİNE LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR

Bilim insanları 1940'lerden bu zamana, ince daneli zeminlerin kompaksiyon değişkenlerinin tahmini üzerine birçok analizlerde ve girişimlerde bulunmuşlardır. Kompaksiyon parametrelerinin tahminine yönelik denklemler geliştirmişlerdir. Bunlardan bazıları; Jeng ve Strohm (1976), Rowan ve Graham (1948), Davidson and Gardiner (1949), Jumikis (1958), isimli bilim insanlarıdır. Ramiah ve diğ. (1970) kompaksiyon değişkenlerini likid limit üzerinden tahmin etmeye çalışmışlardır [22]. Jeng ve Sthorm (1976), 85 adet zeminin index özelliklerini kullanarak standart proktor deneyi sonucu bulunan w_{opt} ile γ_{kmax} 'ı tahmin etmeye çalışmışlardır [35]. Blotz ve diğ. (1998) 22 adet ince daneli zemin için, kompaksiyon parametrelerini likid limit ve kompaksiyon enerjisi cinsinden tahmin etmeye çalışmışlardır [36]. Gürtuğ ve Sridharan (2002 ve 2004) kompaksiyon parametrelerinin tahmininde, çeşitli kompaksiyon enerjilerdeki plastik limit değerleri cinsinden tahmin etmeye çalışmışlardır [37-38]. Joslin (1959) ise 26 adet kompaksiyon eğrisinden belirli bir su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık yardımı ile sağlıklı bir model oluşturmuştur [22]. Pandian ve diğ. (1997) ile Nagaraj ve diğ. (2006), kompaksiyon parametrelerinin tahmini adına yapılan bir çalışmada, zeminin kuru ve ıslak durum likit limit ve özgül ağırlık değerleri için ayrı ayrı çalışmalar

yapmışlardır[39-40]. Yapılan bu çalışma Joslin'in eğrisine benzer bir eğri oluşturmuştur. Fakat bu modelin sadece standart proktor enerjisi altında sıkıştırılan ince daneli zeminler için uygulanması öngörülmüştür. Yine Horpibulsuk ve ark. (2008 ve 2009) ince ve iri daneli zeminlerin farklı sıkıştırma enerjileri altında kompaksiyon eğrileri adına çok fenomen bir model önermişlerdir[41-42]. Ayrıca Sridharan, Nagaraj (2005) ve Sivrikaya (2007-2008) ince daneli zeminlerin kompaksiyon parametrelerini likid limit ve plastik limit cinsinden tahmin etmeye çalışmışlardır [22, 43-44]. Wang ve Huang (1984) çeşitli zeminleri, bentonit ile karıştırarak kompaksiyon parametrelerini tahmin etmeye çalışmışlardır [45]. Horpibulsuk ve ark. maksimum kuru birim hacim ağırlığı CBR (Kaliforniya taşıma oranı) cinsinden tahmin etmeye çalışmışlardır [41-42]. Ayrıca Işık (2012), ve Soyca (2008) kompaksiyon parametrelerini yapay sinir ağı yöntemi ile tahmin etmeye çalışmıştır[44, 31]. Ölmez (2007) regresyon analizi ile iri daneli zeminler üzerinden modeller oluşturmuştur[22].

Çizelge 4.11'de kompaksiyon parametrelerinin tahmini üzerine oluşturulan, literatürde yer alan bazı önemli denklemler toplu halde verilmiştir.

Çizelge 4.11 Literatürde bulunan önemli denklemler.

Yazarı	Denklem	R	SH %,kNm ³
Wang ve Huang (1984)[45]	$\gamma_{kmax}=(G_s/100)(45,6-1,28\dot{M}\log D_{10}-6,64 \times 10^2 \dot{M}PL+1,43\dot{M})$	0,975	
	$\gamma_{kmax}=(G_s/100)(45,9+7,5\dot{M}-0,45\log U-7,54 \times 10^{-2} \dot{M})$	0,955	
	$w_{opt}=0,01(26,14+12,7PL-95\dot{M}^2-88,10\log^2 U$	0,938	
	$w_{opt}=0,01(1035-905\log D_{50}+0,22C^2+106\dot{M}\log D_{50}$	0,889	
Jeng ve Strohm (1976) [35]	$\gamma_{kmax}=0,89(LL-PL)-1,26LL+89,8G_s-102,07$	0,917	3,08
	$w_{opt}=0,611LL-0,42(LL-PL)+2,14$	0,906	1,60
	$\gamma_{kmax}=-0,46LL+127,55$	0,690	4,34
	$w_{opt}=0,23LL+7,54$	0,750	1,87
	$\gamma_{kmax}=1,01(LL-PL)-1,37LL+140,47$	0,780	3,68
	$w_{opt}=0,24(LL-PL)+11,45$	0,650	2,22
Nagaraj (1994) [46]	$w_{opt}=[(9,46+0,2575LL)(8,829+0,228LL)]^{0,5}$	-	
	$\gamma_{kmax}=62,4/[(1/G_s)+((9,46+0,2575)^2/w_{opt})]$	-	
Sivrikaya (2007) [B3, 22'den]	$w_{opt}=0,94PL$ (Standart Proktor)	0,999	3,35
	$w_{opt}=0,69PL$ (Modifiye Proktor)	0,987	2,32
Sivrikaya ve ark. (2007-2008) [B1, 31'den] [B2, 31'den]	$\gamma_{kmax}=21,84-0,27w_{opt}$ (Standart Proktor)	0,970	0,45
	$\gamma_{kmax}=22,07-0,27w_{opt}$ (Modifiye Proktor)	0,660	0,78
	$\gamma_{kmax}=21,97-0,27w_{opt}$ (Standart Proktor)	0,970	0,64
	$\gamma_{kmax}=23,78-0,38w_{opt}$ (Modifiye Proktor)	0,950	0,52
	$w_{opt}=(1,99-0,165\ln E)PL$	0,996	-
	$\gamma_{kmax}=(14,34+1,195\ln E)-(0,073\ln E-0,19)w_{opt}$	0,997	-
	$\gamma_{kmax}=CBR_{max}+9,63$ (ince daneli zeminler)	0,850	-
Horpibulsuk ve ark. (2008,2009) [41-42]	$15 \text{ kNm}^3 < \gamma_{kmax} < 20 \text{ kNm}^3$		
	$\gamma_{kmax}=(CBR_{max}+9,08)/2,95$ (lateritik zeminler)	0,850	-
	$19,5 \text{ kNm}^3 < \gamma_{kmax} < 21,5 \text{ kNm}^3$		
	$\gamma_{kmax}=(CBR_{max}+276,76)/17,44$ (ezilmiş kaya zemin)	0,850	-
Blotz ve diğ. (1998) [36]	$w_{opt}=(12,39-12,21\log LL)\log E+0,67LL+9,21$		
	$\gamma_{kmax}=(2,27\log LL-0,94)\log E-0,16LL+17,02$		

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Kompaksiyonun etkili parametreleri olan optimum su içeriği ile maksimum kuru birim hacim ağırlık geoteknik mühendisliği proje ve tasarımında ayrı bir öneme sahiptir. Ayrıca kompaksiyon zeminlerin stabilizasyonu için kullanılan en ekonomik yöntemlerden biridir. Kompaksiyon, zeminin kayma dayanımını ve şişme özelliğini artırır. Ancak tekrarlı sıkışabilirliğini, permeabilitesini ve rötre özelliğini azaltır. Sıkıştırma işleminde su kullanılır. Su, danelerin birbiri üzerinden kaymasını kolaylaştırır. Belli bir zemin numunesi için belirli bir sıkıştırma enerjisi ile en yüksek sıkışmayı sağlayan değer optimum su içeriğidir. Sıkışma miktarı kuru birim hacim ağırlık ile ölçülür. Kompaksiyon enerjisi arttıkça optimum su içeriği azalmakta, kuru birim hacim ağırlık artmaktadır. Optimum su içeriğine karşılık gelen birim hacim ağırlık değeri maksimum kuru birim hacim ağırlıktır. Sıkıştırma işlemi ile zemin boşluklarındaki hava oranı azaltılır. %0 hava boşluğu ideal bir durum olup, genel olarak %5~15'lik bir boşluk kompaksiyona rağmen vardır. Zemin türlerine göre optimum su içeriği iri daneli zeminlerde %7-8 gibi değerlerle başlarken, ince daneli zeminlerde yaklaşık %25-30 değerlerine kadar ulaşır.

Bu bilgiler ışığında sağlıklı bir kompaksiyonun meydana gelmesi adına optimum su içeriğinde maksimum kuru birim hacim ağırlığın elde edilmesi gerekmektedir. Bazı ekonomik ve elverişsiz sebeplerden dolayı kompaksiyonun etkili parametrelerinin belirlenmesi güç duruma düşebilmektedir. Böyle durumlarda regresyon ve korelasyon analizleri gibi istatistiksel analizler vasıtasıyla elde edilen denklemler fayda sağlamaktadır. Ayrıca istatistiksel analizlerin güvenilirliği determinasyon katsayısı (R^2), korelasyon katsayısı (R) ve standart hata (SH) gibi parametrelerin bulunmasıyla teyit edilebilir. Korelasyon sayısının 1'e, standart hatanın da 0'a yaklaşması denklemin güvenilirliğini artırmaktadır.

Bu tez çalışmasında, ince daneli zemin numuneleri üzerinde yapılan birtakım deneyler sonucu elde edilmiş veriler (E, LL, PL, PI, G, S, ID) kullanılmıştır. Söz konusu zemin verileri

bağımsız değişken, kompaksiyon parametreleri(w_{opt} , γ_{kmax}) bağımlı değişken olmak kaydı ile Rgui ve Excel programları vasıtasıyla regresyon analizine tabi tutulmuş ve güvenilir denklemler oluşturulmuştur. Kompaksiyon parametrelerinin tahmin edildiği modellerde çakıl oranı (G), kum oranı (S), ince dane oranı (ID), kompaksiyon enerjisi (E), likit limit (LL), plastik limit (PL), plastisite indisi (PI) bağımsız, γ_{kmax} ve w_{opt} ise bağımlı değişkenler olarak ele alınmıştır.

Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’de ince daneli zeminler üzerinde yapılmış standart proktor deneyi sonucu bulunan w_{opt} , γ_{kmax} reel değerleri, Çizelge 4.6 da gösterilen regresyon analizi sonucu elde edilmiş modeller ile tahmin edilmeye çalışılmış, sonuçlar ve oluşan farklar tablo halinde gösterilmiştir.

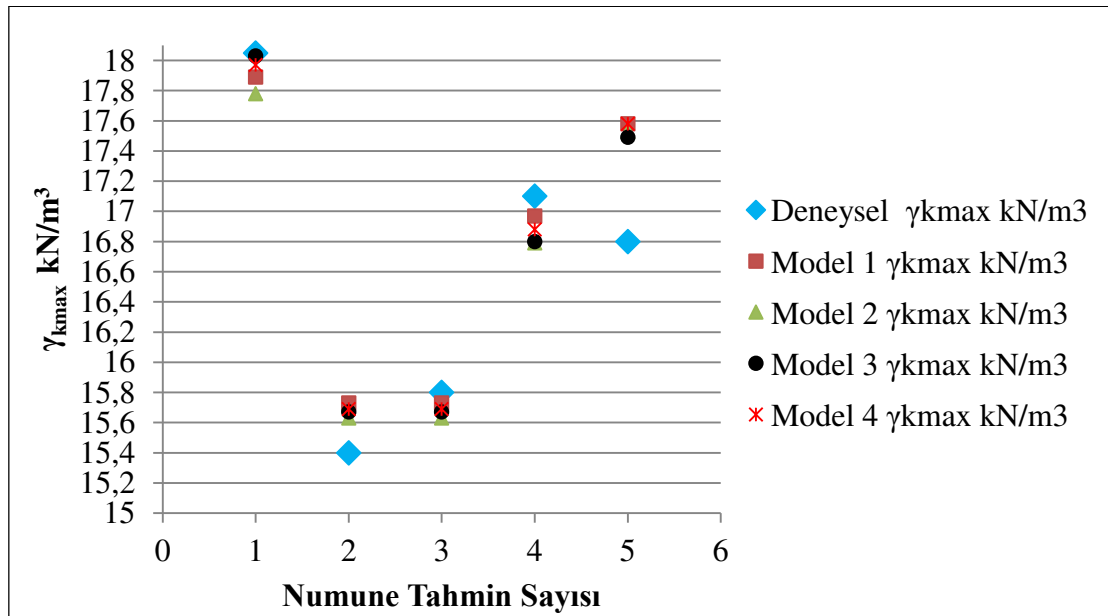
Çizelge 5.1 Kompaksiyon parametrelerinin (Standart Proktor) reel değerleri, tahmini değerleri ve oluşan farklar.

Deney No		Model 1		Model 2	
1[47]		$\gamma_{kmax} = 22,528-0,309w_{opt}$		$\gamma_{kmax} = 10^{(-0,361\log(W_{opt})+1,679)}$	
$w_{opt} \%$	$\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$	Fark kN/m^3	$\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$	Fark kN/m^3
15,00	18,05	17,89	0,16	17,78	0,27
2[33]		$\gamma_{kmax} = 22,528-0,309w_{opt}$		$\gamma_{kmax} = 10^{(-0,361\log(W_{opt})+1,679)}$	
$w_{opt} \%$	$\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$	Fark kN/m^3	$\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$	Fark kN/m^3
22,00	15,40	15,73	0,33	15,63	0,23
3[33]		$\gamma_{kmax} = 22,528-0,309w_{opt}$		$\gamma_{kmax} = 10^{(-0,361\log(W_{opt})+1,679)}$	
$w_{opt} \%$	$\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$	Fark kN/m^3	$\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$	Fark kN/m^3
22,00	15,80	15,73	0,07	15,63	0,17
4[33]		$\gamma_{kmax} = 22,528-0,309w_{opt}$		$\gamma_{kmax} = 10^{(-0,361\log(W_{opt})+1,679)}$	
$w_{opt} \%$	$\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$	Fark kN/m^3	$\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$	Fark kN/m^3
18,00	17,10	16,97	0,13	16,79	0,31
5[33]		$\gamma_{kmax} = 22,528-0,309w_{opt}$		$\gamma_{kmax} = 10^{(-0,361\log(W_{opt})+1,679)}$	
$w_{opt} \%$	$\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$	Fark kN/m^3	$\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$	Fark kN/m^3
16,00	16,80	17,58	0,78	17,53	0,73

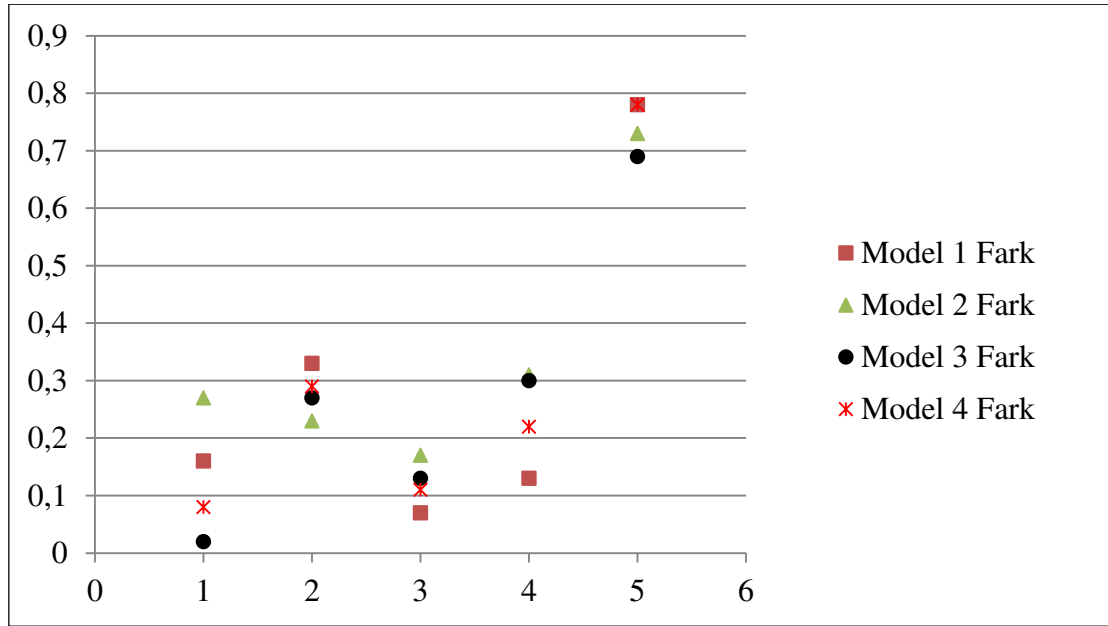
Çizelge 5.2 Kompaksiyon parametrelerinin (Standart Proktor) reel değerleri, tahmini değerleri ve oluşan farklar.

Deney No		Model 3		Model 4	
1[47]		$\gamma_{kmax} = e^{-0,361 \ln(W_{opt})+3,868}$		$\gamma_{kmax} = -13,7045 \log(W_{opt})+34,09$	
W _{opt} %	γ_{kmax} kN/m ³	γ_{kmax} kN/m ³	Fark kN/m ³	γ_{kmax} kN/m ³	Fark kN/m ³
15,00	18,05	18,03	0,02	17,97	0,08
2[33]		$\gamma_{kmax} = e^{-0,361 \ln(W_{opt})+3,868}$		$\gamma_{kmax} = -13,7045 \log(W_{opt})+34,09$	
W _{opt} %	γ_{kmax} kN/m ³	γ_{kmax} kN/m ³	Fark kN/m ³	γ_{kmax} kN/m ³	Fark kN/m ³
22,00	15,40	15,67	0,27	15,69	0,29
3[33]		$\gamma_{kmax} = e^{-0,361 \ln(W_{opt})+3,868}$		$\gamma_{kmax} = -13,7045 \log(W_{opt})+34,09$	
W _{opt} %	γ_{kmax} kN/m ³	γ_{kmax} kN/m ³	Fark kN/m ³	γ_{kmax} kN/m ³	Fark kN/m ³
22,00	15,80	15,67	0,13	15,69	0,11
4[33]		$\gamma_{kmax} = e^{-0,361 \ln(W_{opt})+3,868}$		$\gamma_{kmax} = -13,7045 \log(W_{opt})+34,09$	
W _{opt} %	γ_{kmax} kN/m ³	γ_{kmax} kN/m ³	Fark kN/m ³	γ_{kmax} kN/m ³	Fark kN/m ³
18,00	17,10	16,80	0,30	16,88	0,22
5[33]		$\gamma_{kmax} = e^{-0,361 \ln(W_{opt})+3,868}$		$\gamma_{kmax} = -13,7045 \log(W_{opt})+34,09$	
W _{opt} %	γ_{kmax} kN/m ³	γ_{kmax} kN/m ³	Fark kN/m ³	γ_{kmax} kN/m ³	Fark kN/m ³
16,00	16,80	17,49	0,69	17,58	0,78

Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’de belirtilen tahminler ve oluşan farklar sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Deneyisel değerlere yönelik yapılan tahminler.



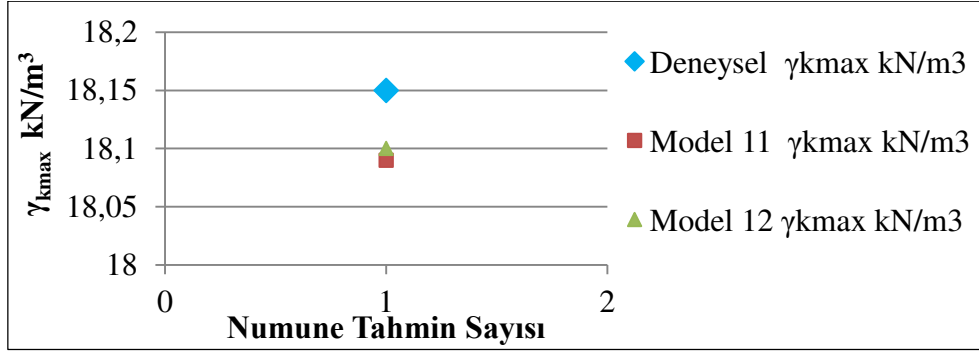
Şekil 5.2 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminlerde meydana gelen farklar.

Çizelge 5.3’de ince daneli zeminler üzerinde yapılmış modifiye proktor deneyi sonucu bulunan w_{opt} , γ_{kmax} reel değerleri, Çizelge 4.10’ da gösterilen regresyon analizi sonucu elde edilmiş modeller (Model 11-Model 12) ile tahmin edilmeye çalışılmış, sonuçlar ve oluşan farklar tablo halinde gösterilmiştir.

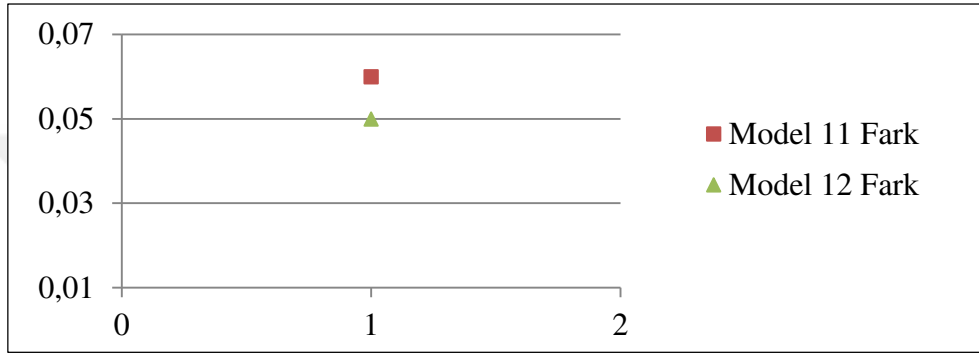
Çizelge 5.3 Kompaksiyon parametrelerinin (Modifiye Proktor) reel değerleri, tahmini değerleri ve oluşan farklar

Deney No		Model 11-Model 12			
7[48]		$\gamma_{kmax} = 9,594\log(E) - 12,751\log(w_{opt})$ $\gamma_{kmax} = 22,715 - 0,319w_{opt}$			
		γ_{kmax} kN/m ³	Fark kN/m ³	γ_{kmax} kN/m ³	Fark kN/m ³
w_{opt} %	γ_{kmax} kN/m ³	γ_{kmax} kN/m ³ (Mod.11)		γ_{kmax} kN/m ³ (Mod.12)	
14,50	18,15	18,09	0,06	18,10	0,05

Çizelge 5.3’de belirtilen tahminler ve oluşan farklar Şekil 5.3 ve 5.4’de sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.



Şekil 5.4 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminlerde meydana gelen farklar.

Kompaksiyon parametrelerinin (S. Proktor) birbirileri cinsinden tahminine yönelik daha önceki bölümlerde (Çizelge 4.6) gösterildiği üzere lineer ve lineer olmayan regresyon analizleri sonucunda aşağıdaki denklemler elde edilmiş, sırasıyla gösterilmiştir.

$$\gamma_{kmax} = 22,528 - 0,309w_{opt}, \text{ (S. Proktor)} \quad (5.1)$$

$$\gamma_{kmax} = 10^{(-0,361\log(W_{opt})+1,679)}, \text{ (S. Proktor)} \quad (5.2)$$

$$\gamma_{kmax} = e^{-0,361\ln(W_{opt})+3,868}, \text{ (S. Proktor)} \quad (5.3)$$

$$\gamma_{kmax} = -13,7045\log(w_{opt})+34,09, \text{ (S. Proktor)} \quad (5.4)$$

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere Sivrikaya ve ark.(2007-2008) birtakım zemin numunelerine ait verileri kullanarak kompaksiyon parametrelerinin birbirileri üzerinden tahmini üzerine denklem 5.5'i önermişlerdir.

$$\gamma_{kmax} = 21,97 - 0,27w_{opt}, (S. Proktor) \quad (5.5)$$

Yine Soycan (2008), birtakım ince daneli zemin numunelerine ait kompaksiyon parametrelerini yapay sinir ağıları yaklaşımı yöntemiyle, tahmin etmeye çalışmıştır. Bazı numunelere ait reel verilere yönelik bahsi geçen tahminler ve kendi modellerimiz ile oluşturulan tahminleri içeren değerler Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5’de sunulmuştur.

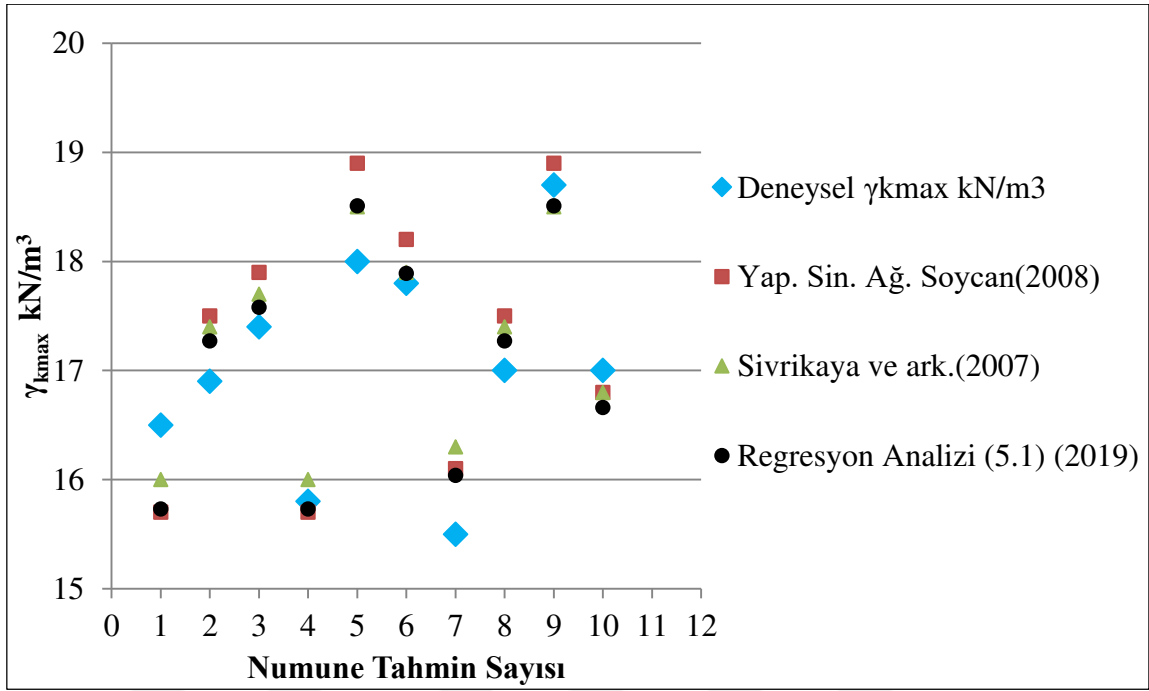
Çizelge 5.4 Kompaksiyon parametrelerinden w_{opt} cinsinden γ_{kmax} ’ a yönelik tahminler.

Veri Sayısı (n)	Deneyssel w_{opt} % (S.Pr.) [31]	Deneyssel γ_{kmax} kN/m ³ (S.Pr.) [31]	Soycan (2008) γ_{kmax} kN/m ³ [31]	Sivrikaya ve ark. (2007-08) Denklem 5.5 γ_{kmax} kN/m ³ [31]	Denklem 5.1’ye göre tahmini γ_{kmax} kN/m ³	Denklem 5.2’ye göre tahmini γ_{kmax} kN/m ³
1	22,00	16,50	15,70	16,00	15,73	15,64
2	17,00	16,90	17,50	17,40	17,27	17,17
3	16,00	17,40	17,90	17,70	17,58	17,55
4	22,00	15,80	15,70	16,00	15,73	15,64
5	13,00	18,00	18,90	18,50	18,51	18,91
6	15,00	17,80	18,20	17,90	17,89	17,96
7	21,00	15,50	16,10	16,30	16,04	15,91
8	17,00	17,00	17,50	17,40	17,27	17,17
9	13,00	18,70	18,90	18,50	18,51	18,91
10	19,00	17,00	16,80	16,80	16,66	16,49

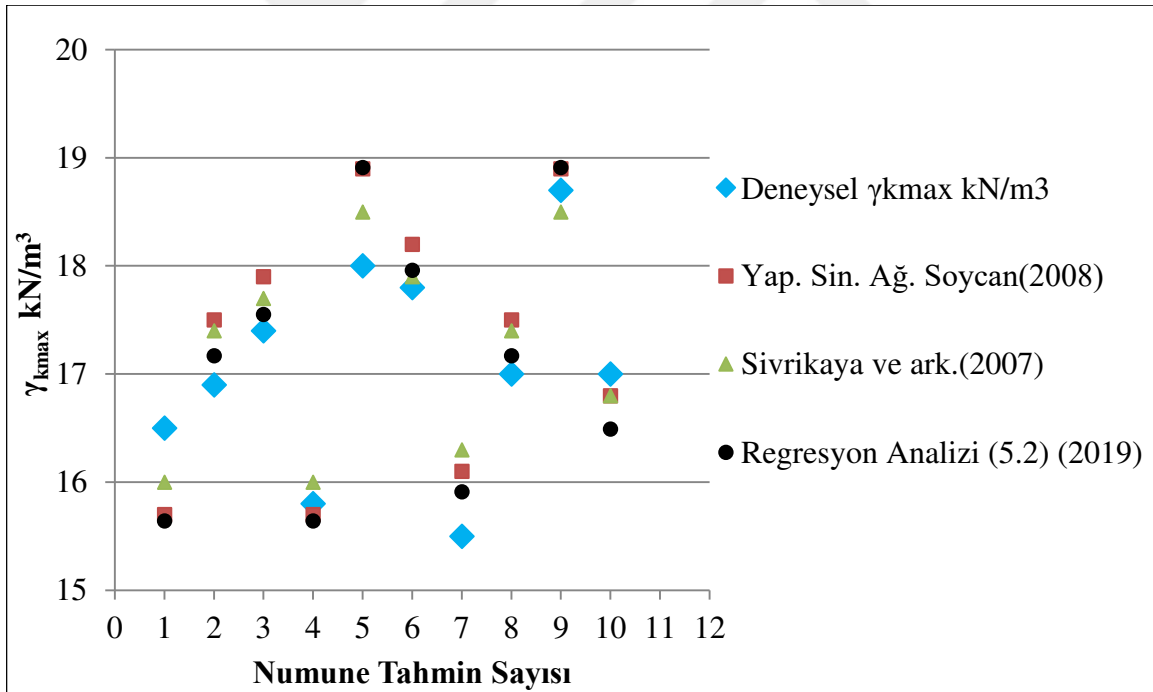
Çizelge 5.5 Kompaksiyon parametrelerinden w_{opt} cinsinden γ_{kmax} ’ a yönelik tahminler.

Veri Sayısı (n)	Deneyssel w_{opt} % (S.Pr.) [31]	Deneyssel γ_{kmax} kN/m ³ (S.Pr.) [31]	Soycan (2008) γ_{kmax} kN/m ³ [31]	Sivrikaya ve ark. (2007-08) Denklem 5.5 γ_{kmax} kN/m ³ [31]	Denklem 5.3’ye göre tahmini γ_{kmax} kN/m ³	Denklem 5.4’ye göre tahmini γ_{kmax} kN/m ³
1	22,00	16,50	15,70	16,00	15,67	15,69
2	17,00	16,90	17,50	17,40	17,23	17,23
3	16,00	17,40	17,90	17,70	17,62	17,59
4	22,00	15,80	15,70	16,00	15,67	15,69
5	13,00	18,00	18,90	18,50	18,98	18,82
6	15,00	17,80	18,20	17,90	18,03	17,97
7	21,00	15,50	16,10	16,30	15,97	15,97
8	17,00	17,00	17,50	17,40	17,23	17,23
9	13,00	18,70	18,90	18,50	18,98	18,82
10	19,00	17,00	16,80	16,80	16,56	16,56

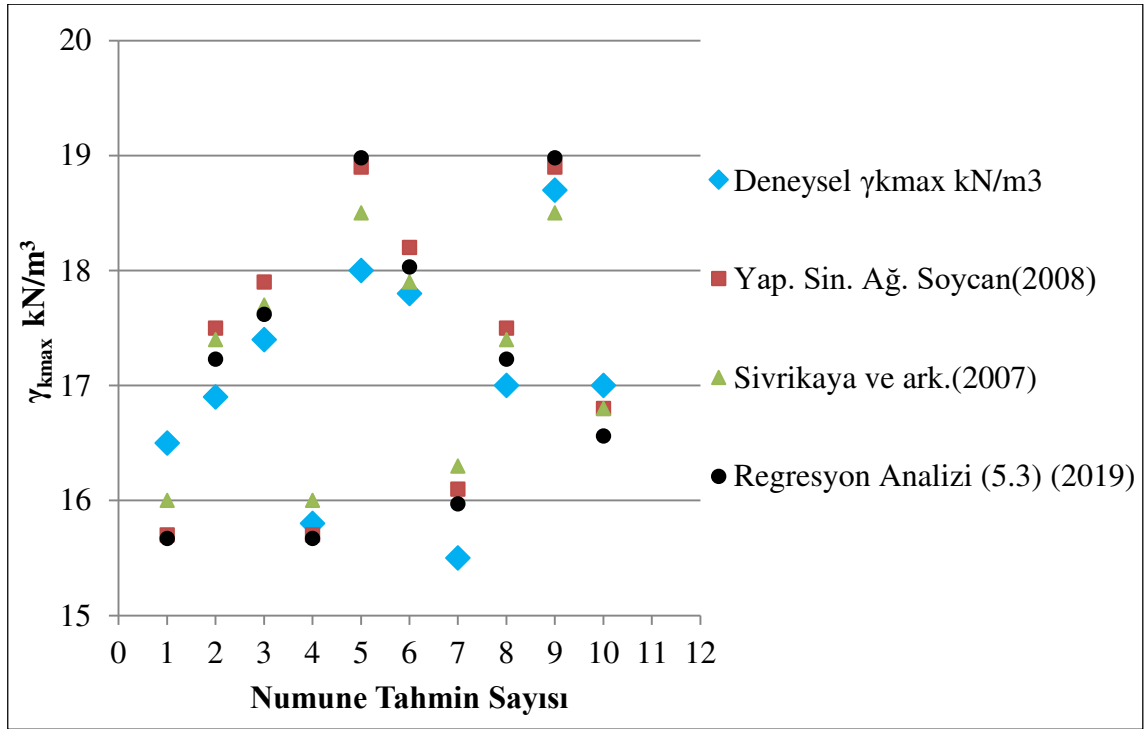
Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5’de tahmin edilen değerler ve oluşan farkların grafiksel gösterimi Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 ’da sunulmuştur.



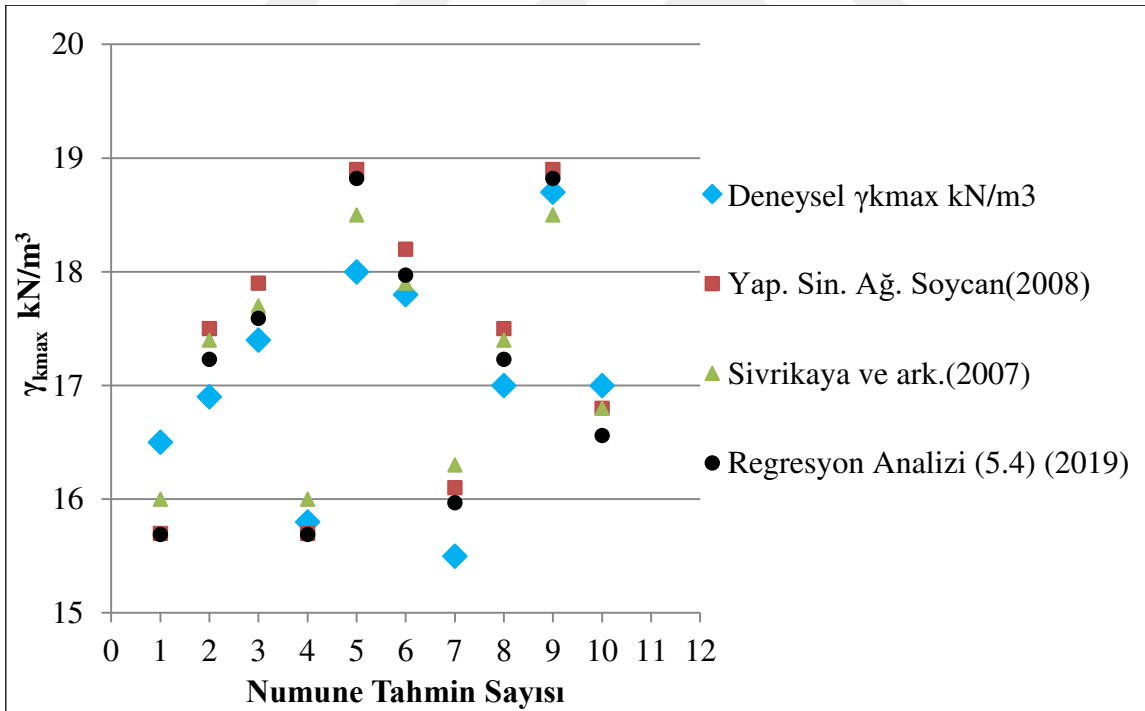
Şekil 5.5 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.



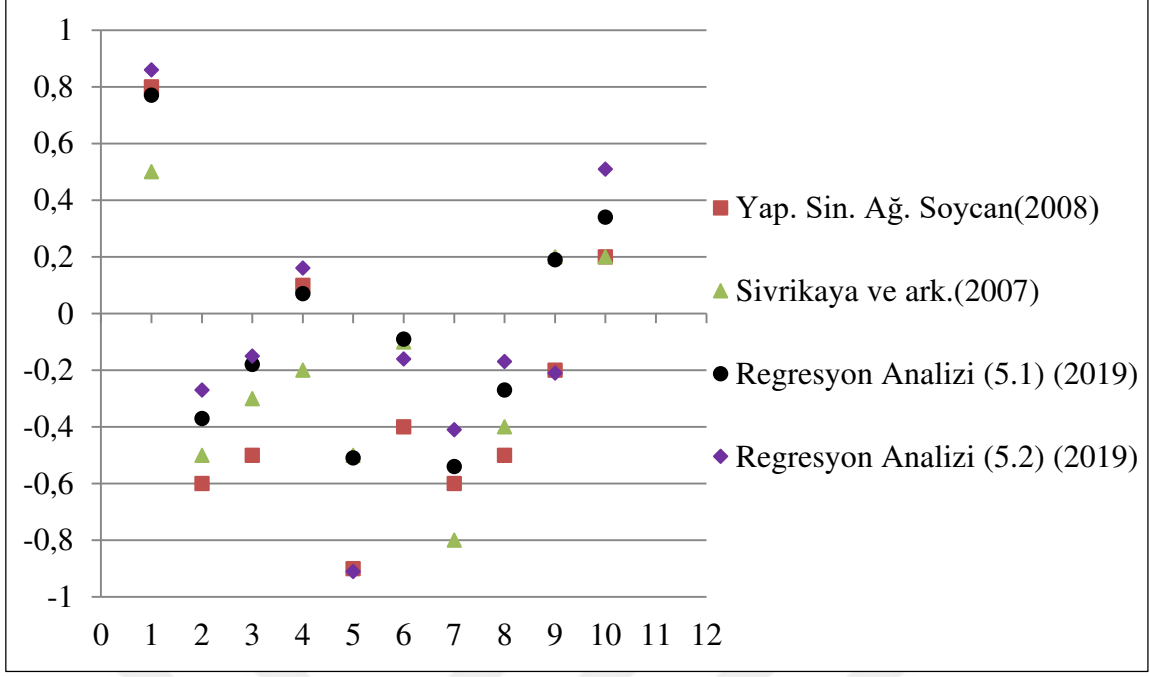
Şekil 5.6 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.



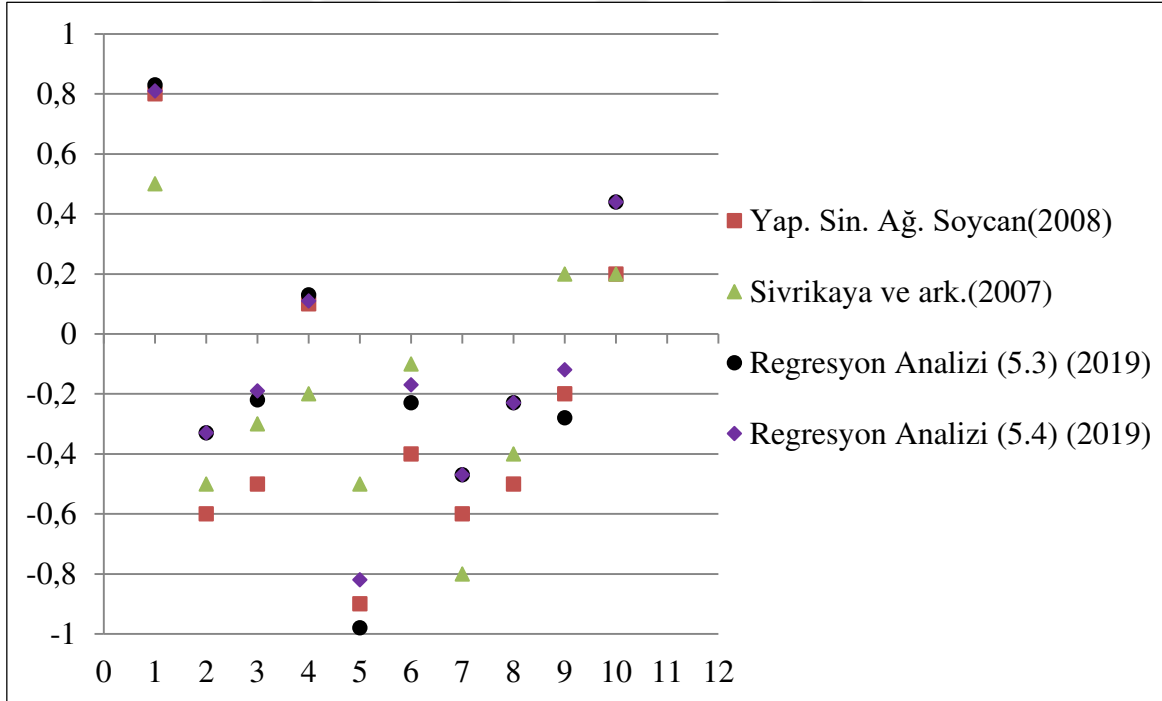
Şekil 5.7 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.



Şekil 5.8 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.



Şekil 5.9 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminlerde meydana gelen farklar.



Şekil 5.10 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminlerde meydana gelen farklar.

Kompaksiyon parametrelerinin (w_{opt} , γ_{kmax}) regresyon analizi uygulanarak kompaksiyon enerjisi (Standart-Modifiye Proktor) ile ilişkisi tahmin edilmiş anlamlı denklemler oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller daha önceki bölümlerde de gösterilmiş olup, sırasıyla (5.6-5.7) belirtilmiştir.

$$\gamma_{kmax} = 12,293\log(E) - 13,704\log(w_{opt}), (S. Proktor) \quad (5.6)$$

$$\gamma_{kmax} = 9,594\log(E) - 12,751\log(w_{opt}), (M. Proktor) \quad (5.7)$$

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere Sivrikaya ve ark.(2007-2008) kompaksiyon parametreleri ve kompaksiyon enerjisi ile ilgili denklem 5.8'i önermişlerdir.

$$\gamma_{kmax}=(14,34+1,195\ln E)-(0,073\ln E-0,19)w_{opt}, (S. ve M. Proktor) \quad (5.8)$$

Yine Soycan(2008) ince daneli birtakım zemin numuneleri için yapay sinir ağları yaklaşımı yöntemiyle, kompaksiyon enerjisi ve optimum su muhtevası cinsinden maksimum kuru birim hacim ağırlığı tahmin etmeye çalışmıştır. Söz konusu tahminler ve kendi modellerimiz ile oluşturulan tahminleri içeren değerler Çizelge 5.6 ve Çizelge 5.7'de sunulmuştur.

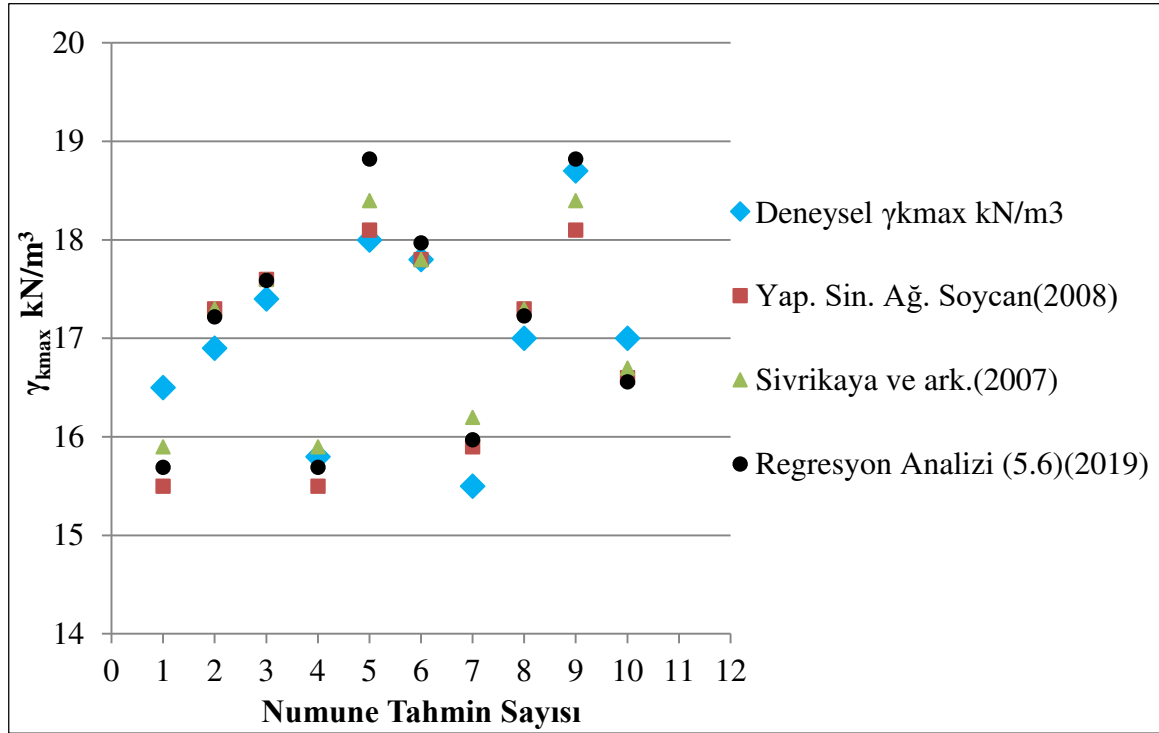
Çizelge 5.6 Kompaksiyon enerjisi ve w_{opt} cinsinden γ_{kmax} 'a yönelik tahminler.

Veri Sayısı (n)	Deneyssel $w_{opt} \%$ (S.Proktor) [31]	Deneyssel $\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$ (S.Proktor) [31]	Yapay Sinir Ağları Yaklaşımı Soycan (2008) $\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$ [31]	Sivrikaya ve ark. (2007-08) Denklem 5.8 $\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$ [31]	Denklem 5.6'ya göre tahmini $\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$
1	22,00	16,50	15,50	15,90	15,69
2	17,00	16,90	17,30	17,30	17,22
3	16,00	17,40	17,60	17,60	17,59
4	22,00	15,80	15,50	15,90	15,69
5	13,00	18,00	18,10	18,40	18,82
6	15,00	17,80	17,80	17,80	17,97
7	21,00	15,50	15,90	16,20	15,97
8	17,00	17,00	17,30	17,30	17,23
9	13,00	18,70	18,10	18,40	18,82
10	19,00	17,00	16,60	16,70	16,56

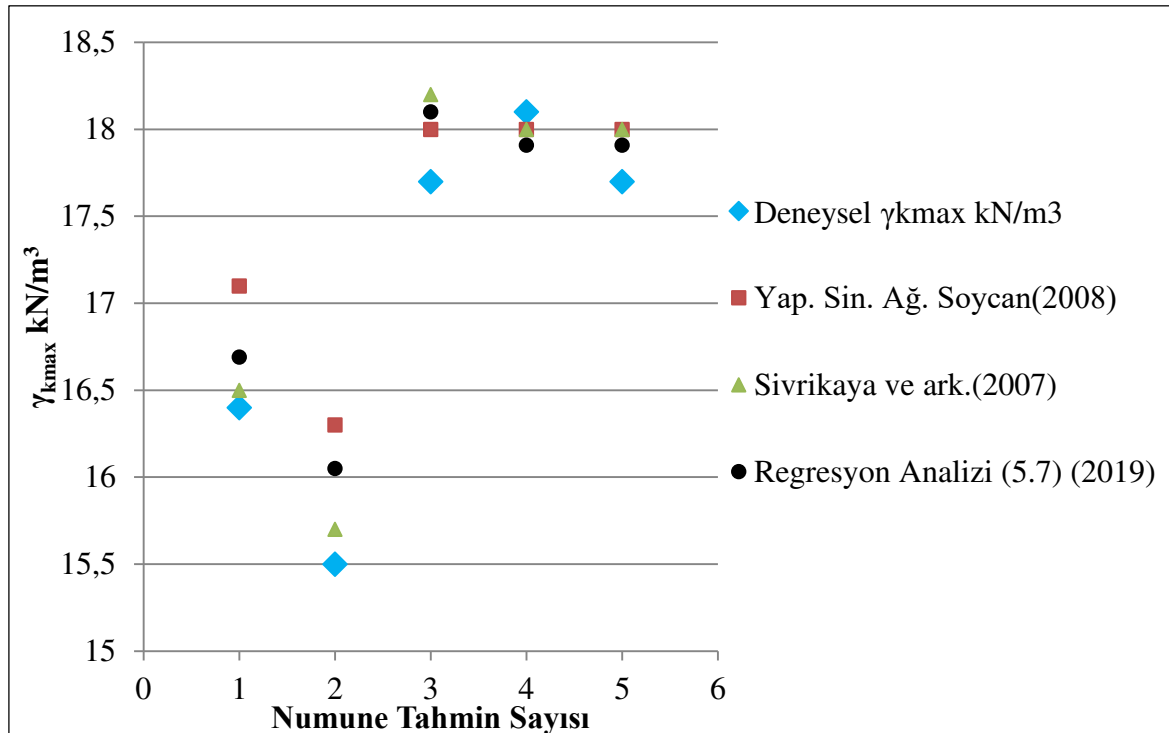
Çizelge 5.7 Kompaksiyon enerjisi ve w_{opt} cinsinden γ_{kmax} 'a yönelik tahminler.

Veri Sayısı (n)	Deneyssel $w_{opt} \%$ (M.Proktor) [31]	Deneyssel $\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$ (M.Proktor) [31]	Yapay Sinir Ağları Yaklaşımı Soycan (2008) $\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$ [31]	Sivrikaya ve ark. (2007-08) Denklem 5.8 $\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$ [31]	Denklem 5.7'ye göre tahmini $\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$
1	18,70	16,40	17,10	16,50	16,69
2	21,00	15,50	16,30	15,70	16,05
3	14,50	17,70	18,00	18,20	18,10
4	15,00	18,10	18,00	18,00	17,91
5	15,00	17,70	18,00	18,00	17,91

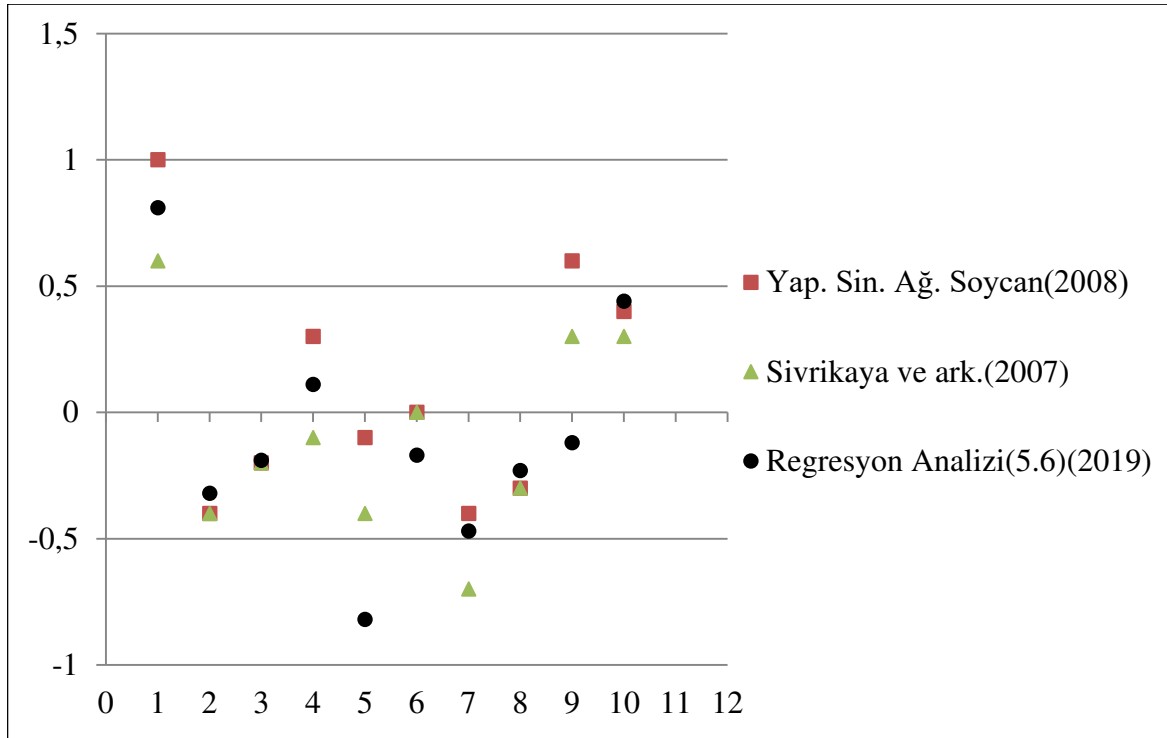
Çizelge 5.6 ve Çizelge 5.7’de gösterilen tahminlerin ve oluşan farkların grafiksel gösterimi Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’de sunulmuştur.



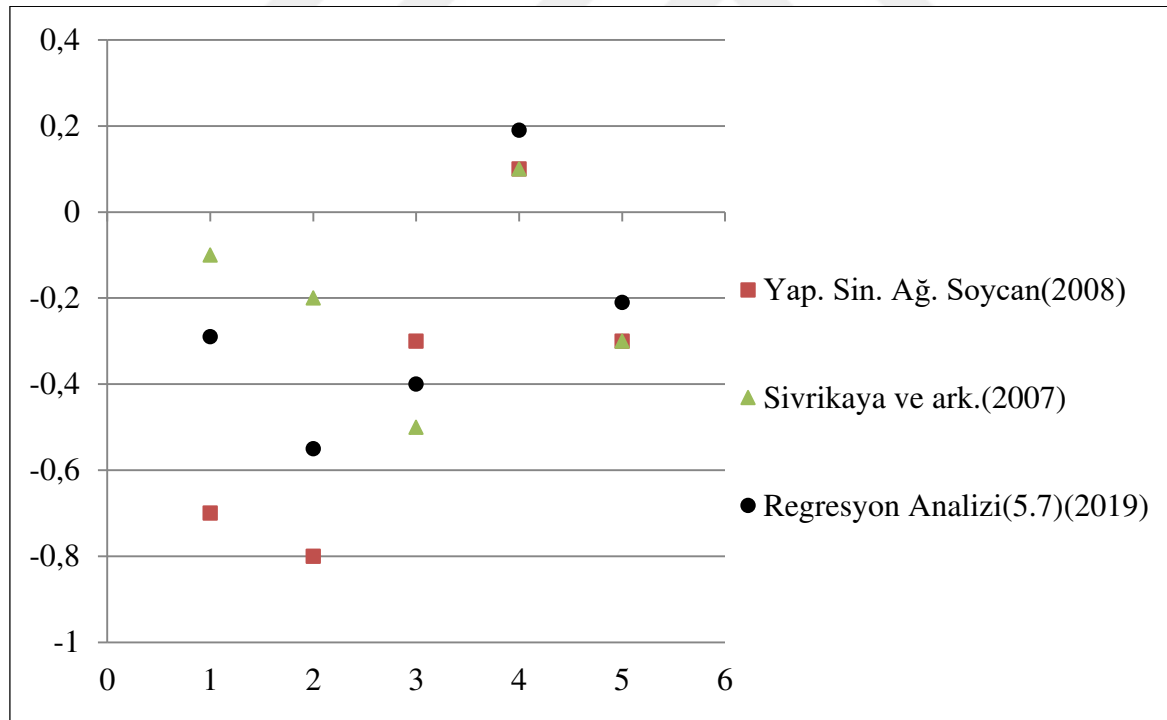
Şekil 5.11 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.



Şekil 5.12 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.



Şekil 5.13 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminlerinde oluşan farklar.



Şekil 5.14 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminlerinde oluşan farklar.

Kompaksiyon parametrelerinin (M. Proktor) birbirileri cinsinden tahminine yönelik daha önceki bölümlerde gösterildiği üzere lineer regresyon analizleri sonucunda denklem 5.9 elde edilmiştir.

$$\gamma_{kmax} = 22,715 - 0,319w_{opt}, \text{ (M. Proktor)} \quad (5.9)$$

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere Sivrikaya ve ark.(2007-2008) kompaksiyon parametrelerinin birbirileri üzerinden tahmini üzerine denklem 5.10'u önermişlerdir.

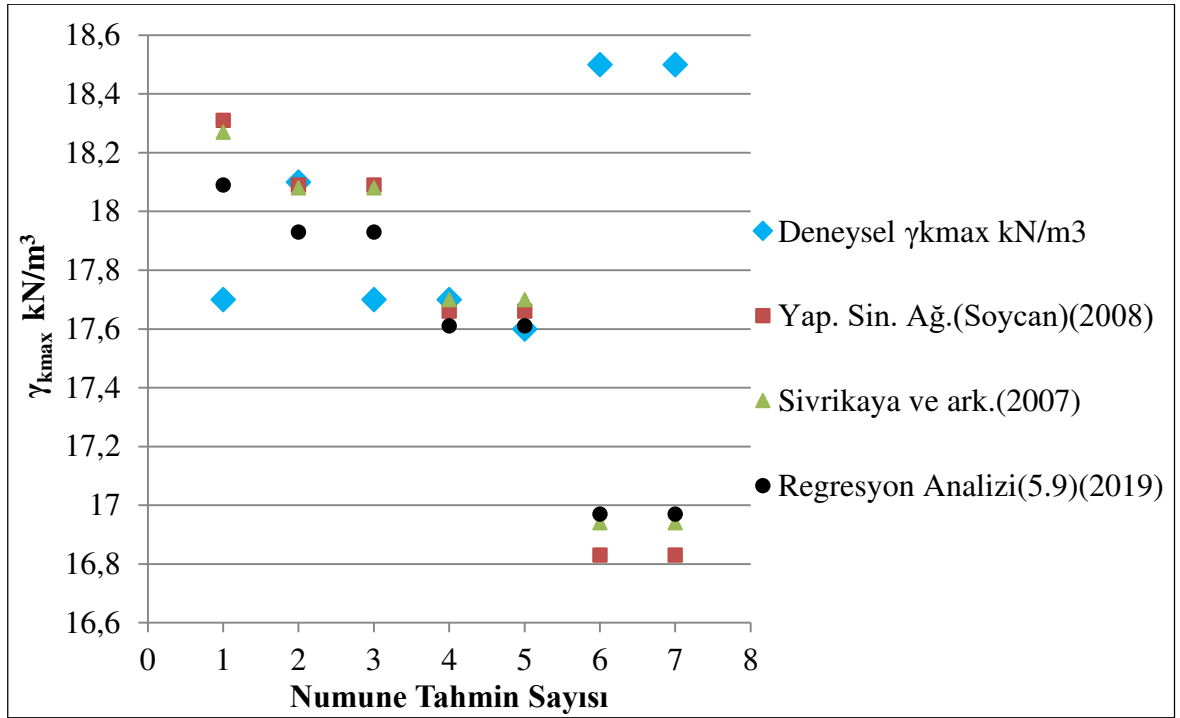
$$\gamma_{kmax}=23,78-0,38w_{opt}, \text{ (M. Proktor)} \quad (5.10)$$

Yine Soycan (2008), ince daneli birtakım zemin numunelerine ait kompaksiyon parametrelerini yapay sinir ağları yaklaşımı yöntemiyle tahmin etmeye çalışmıştır. Söz konusu tahminler ve kendi modelimiz ile oluşturulan tahminleri içeren değerler Çizelge 5.8'de sunulmuştur.

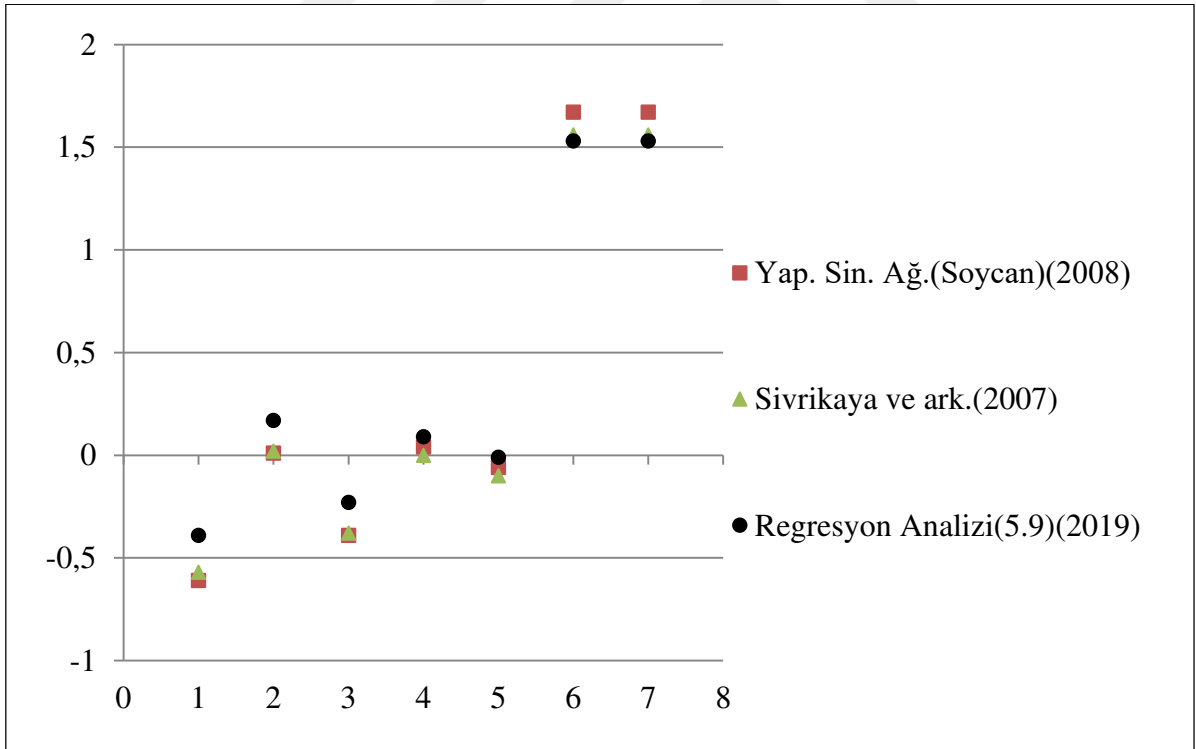
Çizelge 5.8 Kompaksiyon parametrelerinden w_{opt} cinsinden γ_{kmax} ' a yönelik tahminler.

Veri Sayısı (n)	Deneyssel $w_{opt} \%$ (M.Proktor) [31]	Deneyssel $\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$ (M.Proktor) [31]	Yapay Sinir Ağları Yaklaşımı Soycan (2008) $\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$ [31]	Sivrikaya ve ark. (2007-08) Denklem 5.10 $\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$	Denklem 5.9'a göre tahmini $\gamma_{kmax} \text{ kN/m}^3$
1	14,50	17,70	18,31	18,27	18,09
2	15,00	18,10	18,09	18,08	17,93
3	15,00	17,70	18,09	18,08	17,93
4	16,00	17,70	17,66	17,70	17,61
5	16,00	17,60	17,66	17,70	17,61
6	18,00	18,50	16,83	16,94	16,97
7	18,00	18,50	16,83	16,94	16,97

Çizelge 5.8'de gösterilen tahminlerin ve oluşan farkların grafiksel gösterimi Şekil 5.15, Şekil 5.16' da sunulmuştur.



Şekil 5.15 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.



Şekil 5.16 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminlerinde oluşan farklar.

Kompaksiyon parametrelerinden optimum su muhtevasının (S. Proktor-M. Proktor) kıvam limit ve indisleri türünden tahminine yönelik daha önceki bölümlerde gösterildiği üzere yaptığımız regresyon analizleri sonucunda aşağıdaki denklemler 5.11 ve 5.12 elde edilmiştir.

$$w_{opt} = -42,896 \log(LL) + 44,003 \log(PL) + 23,896 \log(PI), \quad (5.11)$$

(S. Proktor)

$$w_{opt} = e^{(0,074 \ln(LL) + 0,588 \ln(PL) + 0,079 \ln(E))} \quad (5.12)$$

(M. Proktor)

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere Sivrikaya ve ark.(2007-2008) kompaksiyon parametrelerinden optimum su muhtevasının tahmini üzerine denklem 5.13, Jeng ve Sthorm (1976), denklem 5.14, Blotz ve diğ.(1998) denklem 5.15'i önermişlerdir.

$$w_{opt} = (1,99 - 0,165 \ln E) PL, \text{ (S.-M. Proktor)} \quad (5.13)$$

$$w_{opt} = 0,611 LL - 0,42(LL - PL) + 2,14 \text{ (S. Proktor)} \quad (5.14)$$

$$w_{opt} = (12,39 - 12,21 \log LL) \log E + 0,67 LL + 9,21, \text{ (S.-M. Proktor)} \quad (5.15)$$

Yine Soycan(2008), ince daneli birtakım zemin numunelerine ait kompaksiyon parametrelerini yapay sinir ağları yaklaşımı yöntemiyle tahmin etmeye çalışmıştır. Söz konusu model ve yaklaşımlarla oluşturulan tahminler ve kendi modellerimiz ile oluşturulan tahminleri içeren değerler Çizelge 5.8'de sunulmuştur.

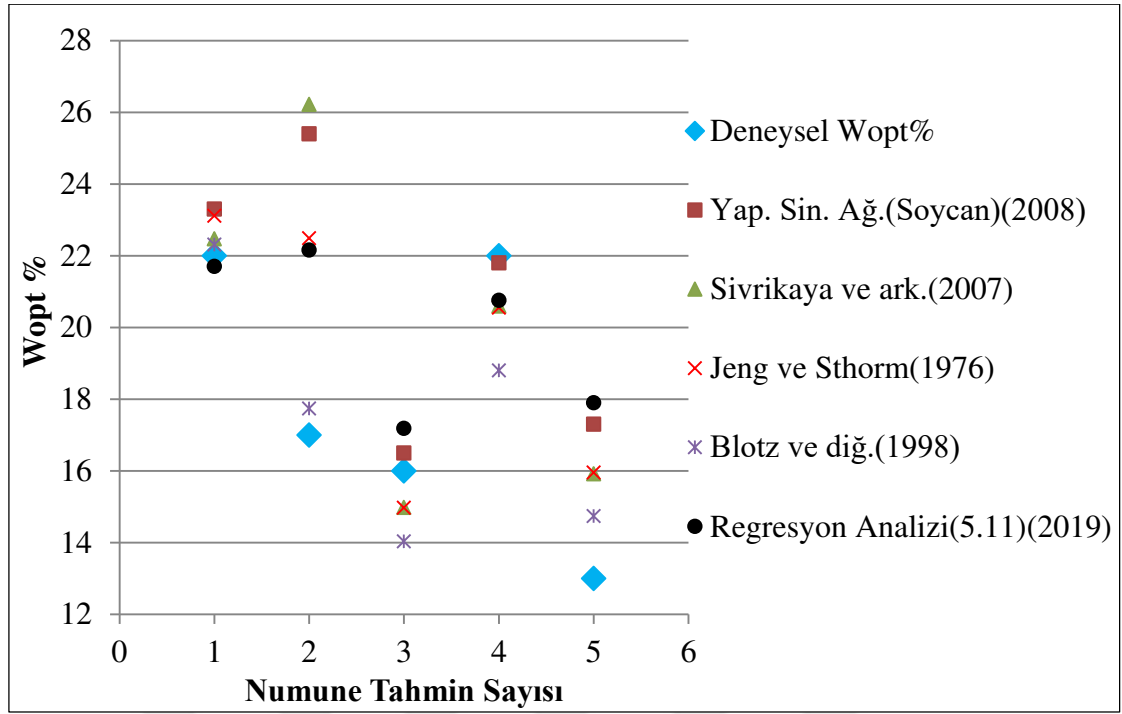
Çizelge 5.9 Kompaksiyon parametrelerinden w_{opt} 'a yönelik tahminler.

Veri Say. (n)	Deney. w_{opt} % (S.Pr.) [31]	Soycan (2008) w_{opt} % [31]	Sivrikaya ve ark. (2007-08) Denklem 5.13 w_{opt} %	Jeng ve Sthorm (1976) Denklem 5.14 w_{opt} %	Blotz ve diğ. (1998) Denklem 5.15 w_{opt} %	Denklem 5.11'e göre tahmini w_{opt} %
1	22,00	23,30	22,47	23,11	22,31	21,70
2	17,00	25,40	26,22	22,49	17,74	22,16
3	16,00	16,50	14,98	14,97	14,04	17,19
4	22,00	21,80	20,60	20,55	18,80	20,76
5	13,00	17,30	15,92	15,96	14,74	17,90

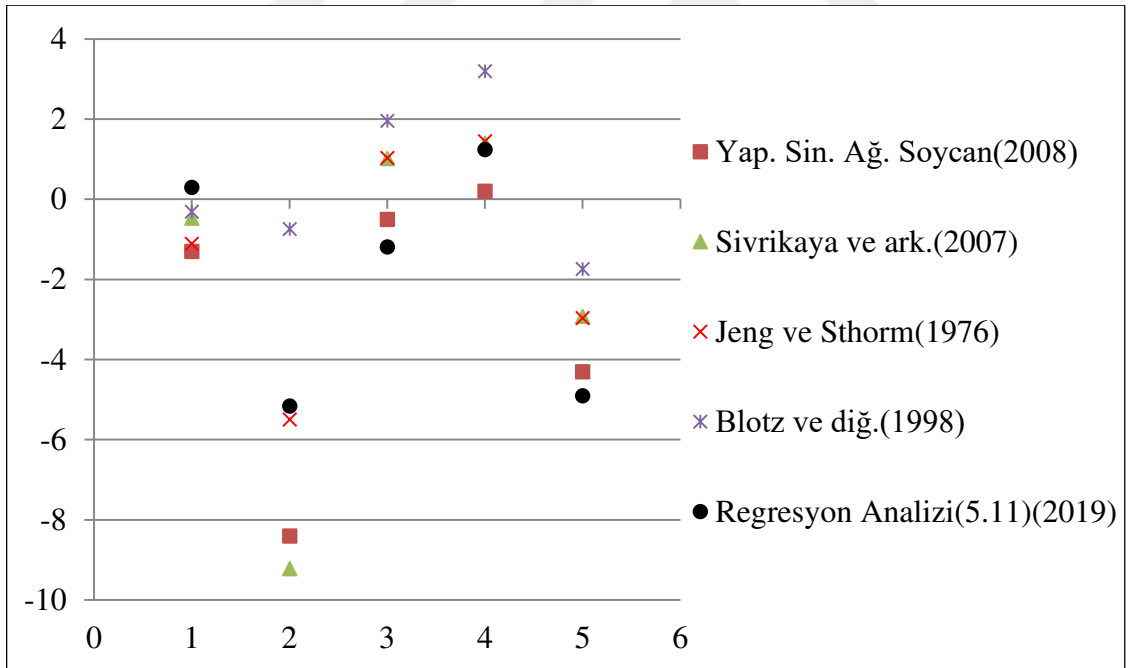
Çizelge 5.10 Kompaksiyon parametrelerinden w_{opt} 'a yönelik tahminler.

Veri Sayısı (n)	Deneyisel w_{opt} % (M.Pr.) [31]	Soycan (2008) w_{opt} % [31]	Sivrikaya ve ark. (2007-08) Denklem 5.13 w_{opt} %	Blotz ve diğ. (1998) Denklem 5.15 w_{opt} %	Denklem 5.12'e göre tahmini w_{opt} %
1	14,50	15,60	14,42	11,63	14,74
2	15,00	16,20	15,11	12,88	15,28
3	15,00	15,00	13,73	12,89	14,45
4	16,00	18,80	17,17	13,75	16,55
5	16,00	17,00	15,79	11,86	15,58

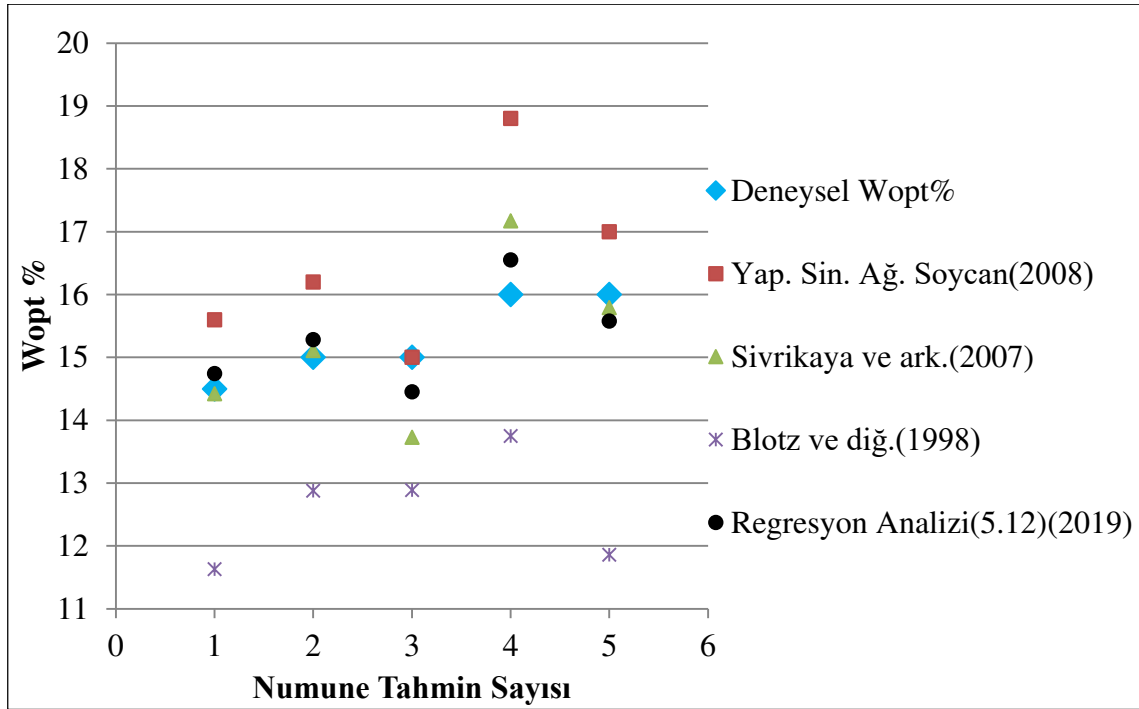
Çizelge 5.9 ve 5.10'da elde edilen tahminlerin ve oluşan farkların grafiksel gösterimi Şekil 5.17, 5.18, 5.19 ve 5.20'de sunulmuştur.



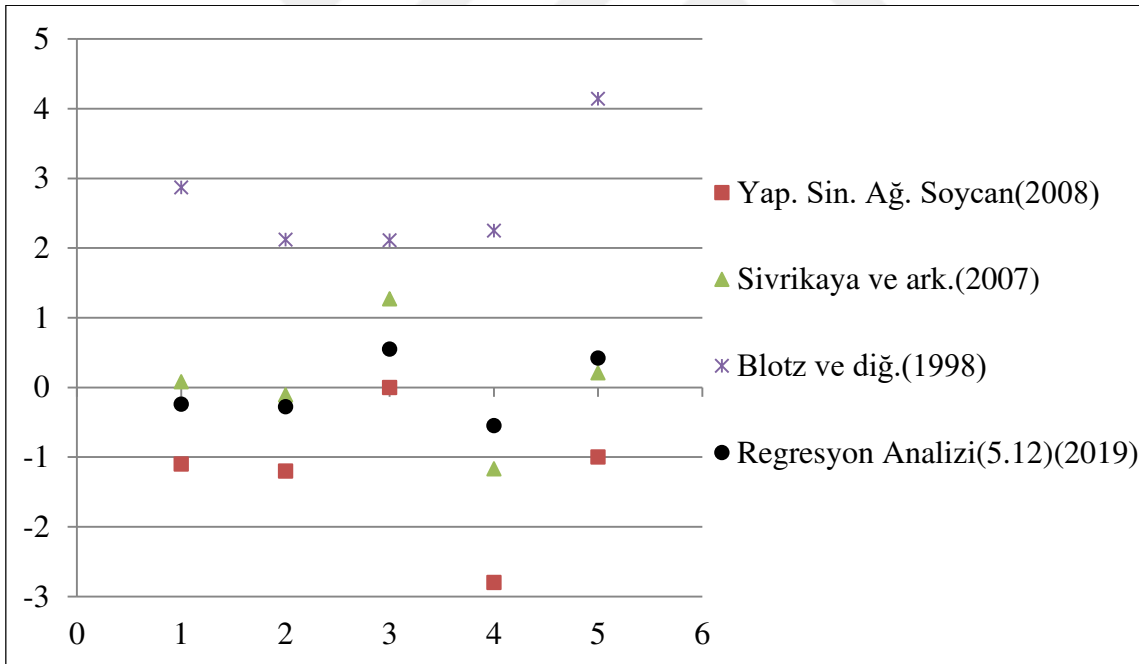
Şekil 5.17 Deneyisel değerlere yönelik yapılan tahminler.



Şekil 5.18 Deneyisel değerlere yönelik yapılan tahminlerinde oluşan farklar.



Şekil 5.19 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminler.



Şekil 5.20 Deneysel değerlere yönelik yapılan tahminlerinde oluşan farklar.

Daha önce de bahsedildiği üzere Sivrikaya ve ark. (2007-2008) kompaksiyon parametrelerinden optimum su muhtevasının tahmini üzerine denklem 5.13, Jeng ve Sthorm (1976) denklem 5.14, Blotz ve diğ. (1998) denklem 5.15'i ayrıca maksimum kuru birim hacim ağırlığının tahmini üzerine Blotz ve diğ. (1998) denklem 5.16'yı da önermişlerdir.

$$\gamma_{kmax}=(2,27\log LL-0,94)\log E-0,16LL+17,02, \text{ (S.-M. Proktor)} \quad (5.16)$$

Çizelge 5.11’de görülen ince daneli zeminlerin deney numunelerine ait veriler kullanılarak, gerek literatür de bulunan denklemler, gerekse tez çalışmamızda istatistiksel analizler sonucu elde ettiğimiz modeller (Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.10) ile söz konusu deney numunelerine ait kompaksiyon parametreleri (w_{opt} , γ_{kmax}) tahmin edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen tahminler çizelgelerde gösterilmiştir.

Çizelge 5.11 Tahminlerde kullanılan veri seti [34].

Deney No	USCS	E (kj/m ³)	LL %	PL %	S %	ID %	S.Proktor % - kN/m ³	M.Proktor % - kN/m ³
1	CH	593/2693	69,20	26,60	46,00	54,00	$w_{opt}=20,90$	$w_{opt}=16,10$
							$\gamma_{kmax}=14,81$	$\gamma_{kmax}=16,68$
2	MH	593/2693	52,60	30,50	39,00	61,00	$w_{opt}=26,80$	$w_{opt}=19,20$
							$\gamma_{kmax}=14,42$	$\gamma_{kmax}=16,19$
3	CH	593/2693	53,10	28,10	42,00	58,00	$w_{opt}=22,90$	$w_{opt}=14,50$
							$\gamma_{kmax}=14,03$	$\gamma_{kmax}=16,38$
4	CH	593/2693	75,00	33,10	40,00	60,00	$w_{opt}=27,50$	$w_{opt}=21,00$
							$\gamma_{kmax}=14,22$	$\gamma_{kmax}=15,99$
5	CL	593/2693	48,80	24,30	49,00	51,00	$w_{opt}=20,00$	$w_{opt}=17,20$
							$\gamma_{kmax}=15,99$	$\gamma_{kmax}=17,46$

Çizelge 5.12 w_{opt} ’un (S.Proktor) literatürde bulunan denklemler ile tahmini.

Veri Say. (n)	Deney. w_{opt} % (S.Pr.) [34]	Sivrikaya ve ark. (2007-08) Denklem 5.13 w_{opt} %	Jeng ve Sthorm (1976) Denklem 5.14 w_{opt} %	Blotz ve diğ. (1998) Denklem 5.15 w_{opt} %
1	20,90	24,90	26,52	27,62
2	26,80	28,56	24,99	20,53
3	22,90	26,31	24,08	20,73
4	27,50	30,99	30,36	30,33
5	20,00	22,75	21,66	19,09

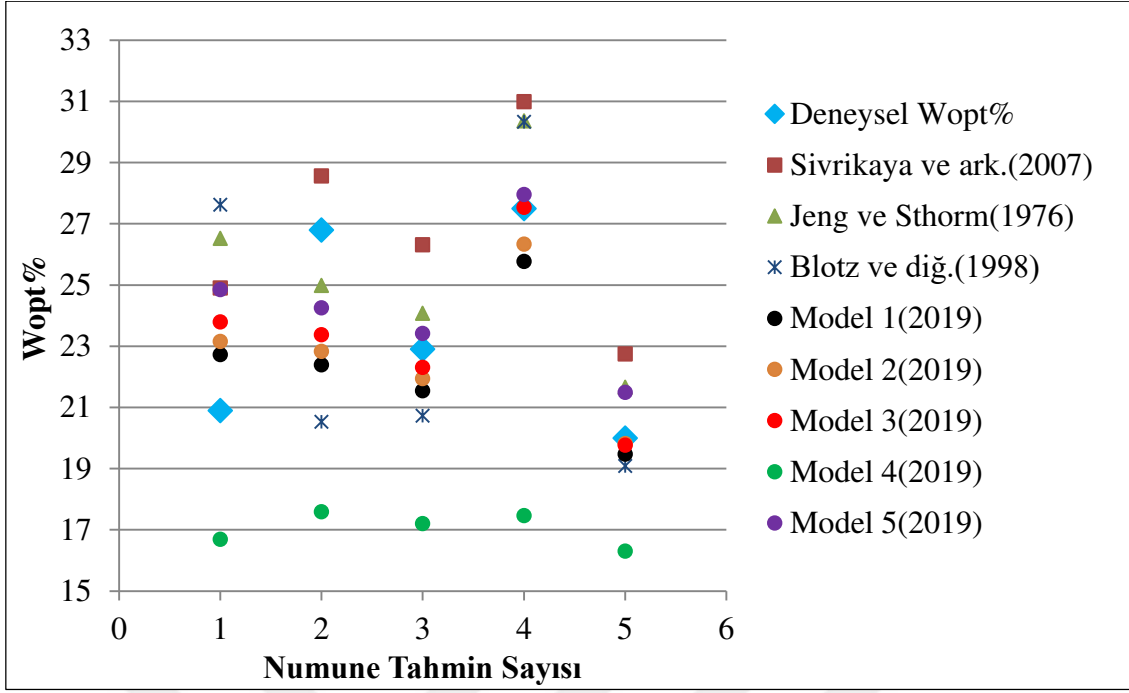
Çizelge 5.13 w_{opt} 'un (S.Proktor) elde edilen modeller ile tahmini.

Veri Say. (n)	Deney. w_{opt} % (S.Pr.) [34]	Model 1'e göre tahmini w_{opt} %	Model 2'ye göre tahmini w_{opt} %	Model 3'e göre tahmini w_{opt} %	Model 4'e göre tahmini w_{opt} %	Model 5'e göre tahmini w_{opt} %
1	20,90	22,73	23,16	23,79	16,69	24,85
2	26,80	22,39	22,83	23,37	17,59	24,25
3	22,90	21,54	21,94	22,31	17,20	23,42
4	27,50	25,77	26,33	27,54	17,46	27,96
5	20,00	19,47	19,82	19,77	16,30	21,49

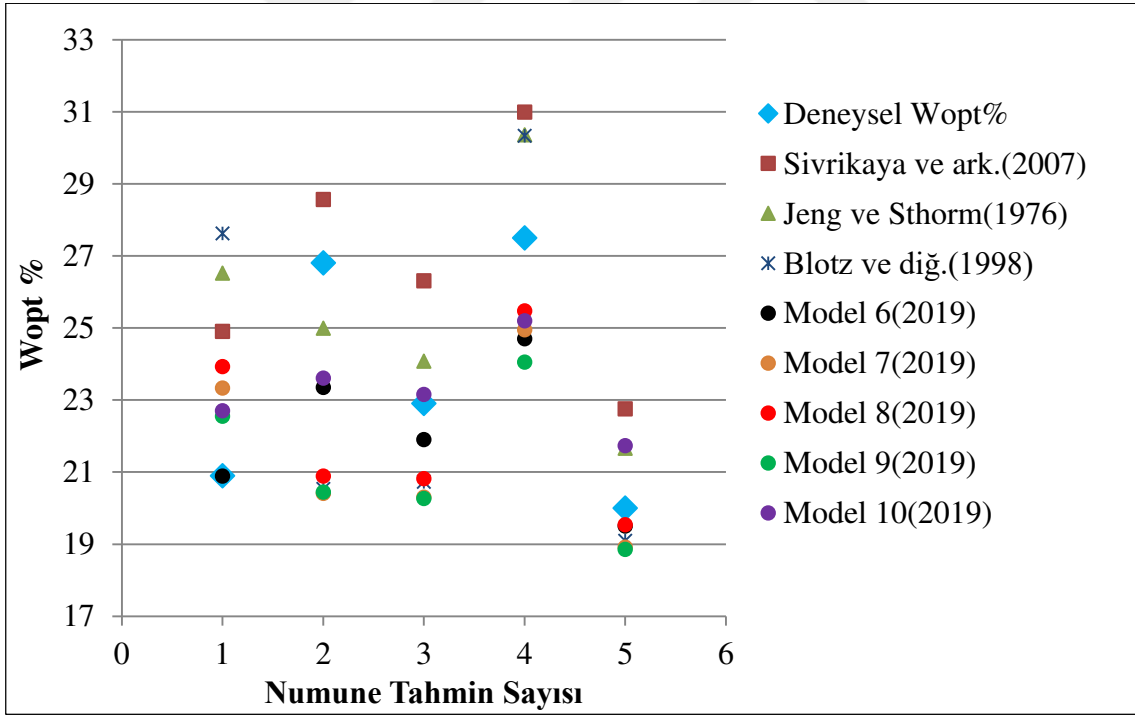
Çizelge 5.14 w_{opt} 'un (S.Proktor) elde edilen modeller ile tahmini.

Veri Say. (n)	Deney. w_{opt} % (S.Pr.) [34]	Model 6'ya göre tahmini w_{opt} %	Model 7'ye göre tahmini w_{opt} %	Model 8'e göre tahmini w_{opt} %	Model 9'a göre tahmini w_{opt} %	Model 10'a göre tahmini w_{opt} %
1	20,90	20,89	23,33	23,93	22,55	22,70
2	26,80	23,35	20,41	20,89	20,44	23,61
3	22,90	21,90	20,30	20,82	20,27	23,15
4	27,50	24,70	24,95	25,47	24,05	25,20
5	20,00	19,50	18,92	19,54	18,85	21,73

Çizelge 5.12, Çizelge 5.13 ve Çizelge 5.14'de, elde edilen tahminlerin grafiksel gösterimi Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'de sunulmuştur.



Şekil 5.21 Literatürdeki denklemlere ve elde edilen modellere ait tahminler.



Şekil 5.22 Literatürdeki denklemlere ve elde edilen modellere ait tahminler.

Çizelge 5.15 γ_{kmax} 'ın (S.Proktor) literatürde bulunan denklem ile tahmini.

Veri Say. (n)	Deney. γ_{kmax} kN/m ³ (S.Pr.) [34]	Blotz ve diğ. (1998) Denklem 5.16 γ_{kmax} kN/m ³
1	14,81	14,92
2	14,42	16,83
3	14,03	16,77
4	14,22	14,21
5	15,99	17,23

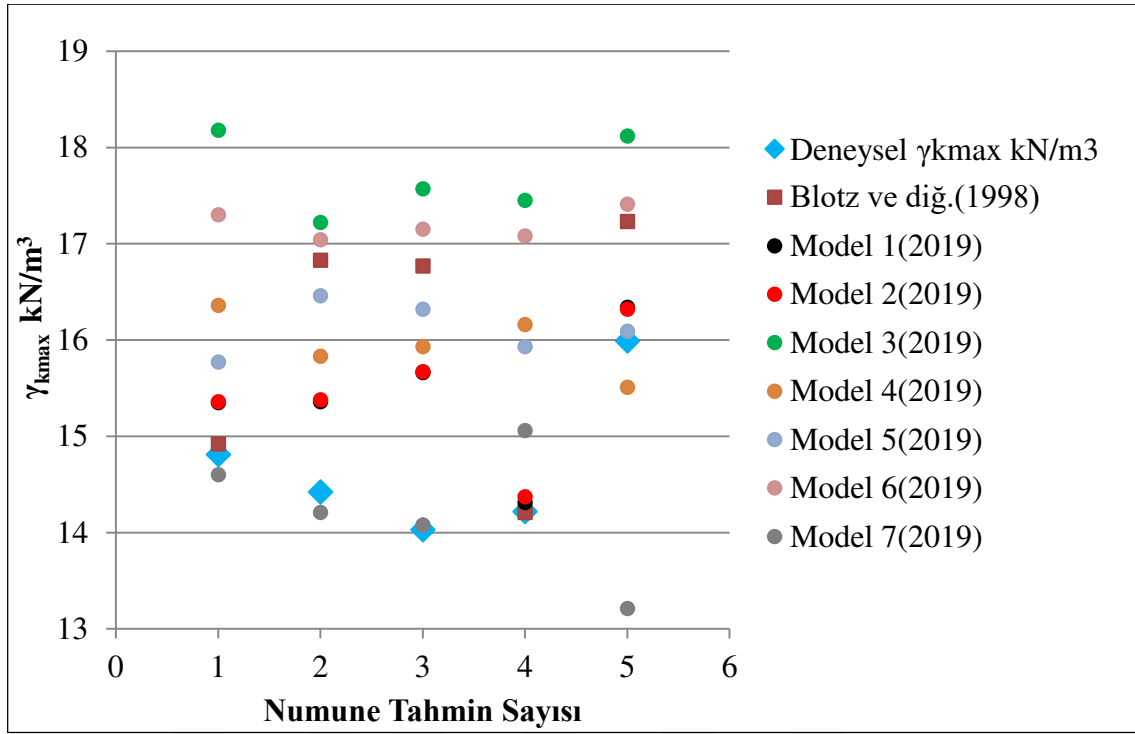
Çizelge 5.16 γ_{kmax} 'ın (S.Proktor) elde edilen modeller ile tahmini.

Veri Say. (n)	Deney. γ_{kmax} kN/m ³ (S.Pr.) [34]	Model 1'e göre tahmini γ_{kmax} kN/m ³	Model 2'ye göre tahmini γ_{kmax} kN/m ³	Model 3'e göre tahmini γ_{kmax} kN/m ³	Model 4'e göre tahmini γ_{kmax} kN/m ³	Model 5'e göre tahmini γ_{kmax} kN/m ³
1	14,81	15,35	15,36	18,18	16,36	15,77
2	14,42	15,36	15,38	17,22	15,83	16,46
3	14,03	15,66	15,67	17,57	15,93	16,32
4	14,22	14,31	14,37	17,45	16,16	15,93
5	15,99	16,34	16,32	18,12	15,51	16,09

Çizelge 5.17 γ_{kmax} 'ın (S.Proktor) elde edilen modeller ile tahmini.

Veri Say. (n)	Deney. γ_{kmax} kN/m ³ (S.Pr.) [34]	Model 6'ya göre tahmini γ_{kmax} kN/m ³	Model 7'ye göre tahmini γ_{kmax} kN/m ³
1	14,81	17,30	14,60
2	14,42	17,04	14,21
3	14,03	17,15	14,08
4	14,22	17,08	15,06
5	15,99	17,41	13,21

Çizelge 5.15, Çizelge 5.16 ve Çizelge 5.17'de belirtilen grafiksel gösterimi Şekil 5.23'de sunulmuştur.



Şekil 5.23 Literatürdeki denkleme ve elde edilen modellere ait tahminler.

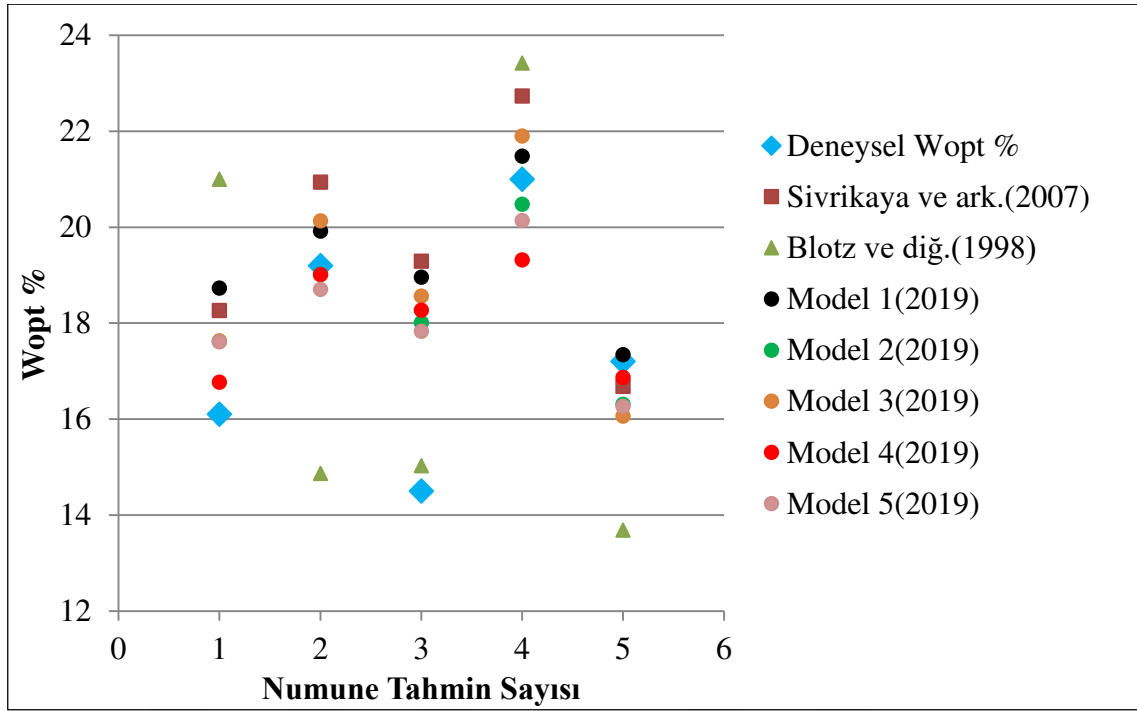
Çizelge 5.18 w_{opt} %'un (M.Proktor) literatürde bulunan denklemler ile tahmini.

Veri Sayısı (n)	Deneysel w_{opt} % (M.Pr.) [34]	Sivrikaya ve ark. (2007-08) Denklem 5.13 w_{opt} %	Blotz ve diğ. (1998) Denklem 5.15 w_{opt} %
1	16,10	18,26	21,00
2	19,20	20,94	14,87
3	14,50	19,29	15,03
4	21,00	22,73	23,42
5	17,20	16,68	13,69

Çizelge 5.19 w_{opt} 'un (M.Proktor) elde edilen modeller ile tahmini.

Veri Say. (n)	Deney. w_{opt} % (M.Pr.) [34]	Model 1'e göre tahmini w_{opt} %	Model 2'ye göre tahmini w_{opt} %	Model 3'e göre tahmini w_{opt} %	Model 4'e göre tahmini w_{opt} %	Model 5'e göre tahmini w_{opt} %
1	16,10	18,73	17,62	17,63	16,77	17,61
2	19,20	19,92	19,02	20,13	19,01	18,70
3	14,50	18,96	18,01	18,56	18,27	17,83
4	21,00	21,48	20,48	21,90	19,32	20,14
5	17,20	17,34	16,31	16,06	16,87	16,27

Çizelge 5.18 ve Çizelge 5.19'da belirtilen tahminlerin grafiksel gösterimi Şekil 5.24'de sunulmuştur.



Şekil 5.24 Literatürdeki denklemlere ve elde edilen modellere ait tahminler.

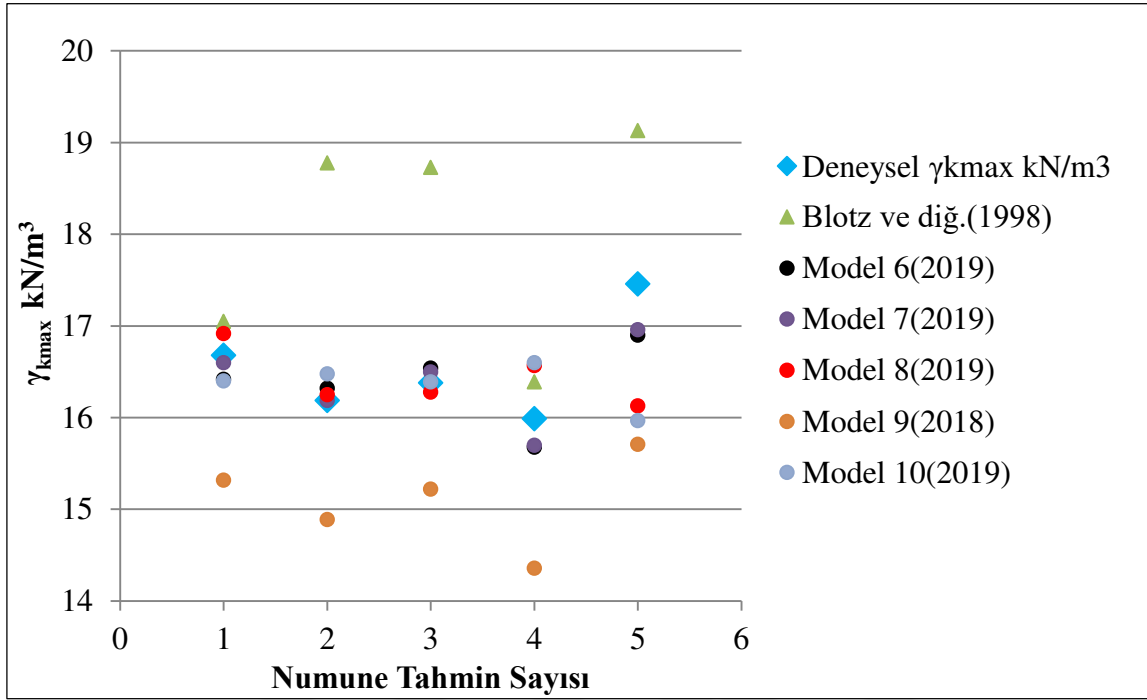
Çizelge 5.20 γ_{kmax} 'ın (M.Proktor) literatürde bulunan denklem ile tahmini.

Veri Say. (n)	Deney. γ_{kmax} kN/m ³ (M.Pr.) [34]	Blotz ve diğ. (1998) Denklem 5.16 γ_{kmax} kN/m ³
1	16,68	17,05
2	16,19	18,78
3	16,38	18,73
4	15,99	16,39
5	17,46	19,13

Çizelge 5.21 γ_{kmax} 'ın (M.Proktor) elde edilen modeller ile tahmini.

Veri Say. (n)	Deney. γ_{kmax} kN/m ³ (M.Pr.) [34]	Model 6'ya göre tahmini γ_{kmax} kN/m ³	Model 7'ye göre tahmini γ_{kmax} kN/m ³	Model 8'e göre tahmini γ_{kmax} kN/m ³	Model 9'a göre tahmini γ_{kmax} kN/m ³	Model 10'a göre tahmini γ_{kmax} kN/m ³
1	16,68	16,42	16,60	16,92	15,32	16,40
2	16,19	16,32	16,19	16,25	14,89	16,48
3	16,38	16,54	16,50	16,28	15,22	16,39
4	15,99	15,68	15,70	16,57	14,36	16,60
5	17,46	16,90	16,96	16,13	15,71	15,97

Çizelge 5.20 ve Çizelge 5.21’de belirtilen tahminlerin grafiksel gösterimi Şekil 5.24’de sunulmuştur.



Şekil 5.25 Literatürdeki denkleme ve elde edilen modellere ait tahminler.

Yapılan analizler sonucu şu kanılara varılmıştır:

- Yapılan regresyon analizleri sonucunda elde edilen modeller anlamlı bulunmuş, modellere ait grafikler, determinasyon katsayıları, standart hatalar ve reel değerlere yönelik yapılan tahminler bu anlamlılığı pekiştirmiştir.
- İnce daneli zeminlerin kompaksiyon parametrelerinin tahmininde kompaksiyon enerjisi, kaba-ince dane oranları, kıvam indis ve limitlerinin etkili olduğu anlaşılmıştır.
- Optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık arasında dört farklı türde anlamlı modeller oluşturulmuş olup, modellerin deneylere yönelik yapılan tahminleri düşük hata oranlı değerler vermiştir. Elde edilen tahminler ve tahminlere ait farklar Çizelge 5.1-5.3’de gösterilmiş olup, Şekil 5.1-5.4’de ayrıca sunulmuştur
- Standart-modifiye proktor veri setlerinden elde edilmiş olan, maksimum kuru birim hacim ağırlığın, optimum su muhtevası cinsinden tahmin edildiği lineer ve lineer olmayan modeller daha önce Çizelge 4.6 ve 4.10’ da sunulmuştur. Söz konusu modeller ile daha önce literatürde yer almış yaklaşım ve modellere ait, maksimum kuru birim hacim ağırlığın optimum su muhtevası cinsinden tahminleri Çizelge 5.4, Çizelge 5.5 ve Çizelge

5.8’de gösterilmiş olup, tahminlere ve farklara ait değerler şekillerle ayrıca gösterilmiştir. Yapılan analizler ve tahminler, literatür de yer alan yaklaşım ve modellere ait tahminler ile kıyaslandığında yeterince anlamlı, güvenilir ve reel değerlere yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

- Standart-modifiye proktor kompaksiyon enerjileri ve optimum su muhtevasının bağımsız değişken, maksimum kuru birim hacim ağırlığının bağımlı değişken olduğu modeller ile yapılan tahminler Çizelge 5.6 ile Çizelge 5.7’de gösterilmiştir. Elde edilen tahminler ve oluşan farklar şekiller ile ayrıca gösterilmiştir. Tez çalışmamızda yaptığımız analizler sonucunda elde edilen tahmin değerleri, daha önce önerilmiş, literatürde ki bazı model ve yaklaşımlarla yapılan tahminler ile kıyaslandığında yeterince anlamlı, güvenilir ve reel değerlere yakın sonuçlar verdiği açıkça görülmüştür.

- Optimum su muhtevasının kıvam indis ve limitleri türünden elde edilen modellerimiz ile oluşan tahmin değerleri literatürde bulunan modeller ile elde edilen tahminler ile kıyaslandığında anlamlı ve reel değerlere yakın sonuçlar olduğu görülmüştür.

- Çizelge 4.4’de en yüksek istatistiksel anlamlılık Model 9’a ait iken yapılan tahminlerde diğer modellerin tahminleri de reel değerlere yakın sonuçlar vermiştir. Çizelge 4.5’de Model 1 ve Model 2 gerek istatistiksel anlamlılık gerekse tahminlerde ön plana çıkmaktadır. Çizelge 4.10’da optimum su içeriği için Model 5, maksimum kuru birim hacim ağırlık için ise Model 6, Model 7, ve Model 10 gerek istatistiksel anlamlılık, gerekse tahminlerde ön plana çıkmıştır.

- Günümüzde zeminlerin iyileştirilmesi ve güçlendirilmesi gibi konularda ehemmiyeti ve gerekliliği tartışılmaz olan ekonomi ve zaman tasarrufu gibi durumların hasıl olması neticesinde, analizler sonucu elde ettiğimiz modellerin kullanılmasının yarar getireceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Önalp A** (2013) *Geoteknik Bilgisi 1 Zeminler ve Mekaniği Çözümlü Problemlerle*, IV. Baskı, ISBN:9789755113043, Birsen Yayınevi, İstanbul, 91-107, 423-457.
- [2] **Yayla N** (2006) *Karayolu Mühendisliği*, ISBN:9789755112879 Birsen Yayın Evi, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi, İstanbul, 237-243.
- [3] **Tunç A** (2002) *Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları*, 1. Baskı, ISBN:9789756574216, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, 187-217.
- [4] **Schroeder W L, Dickenson S E and Warrington D C** (2004) *Soil in Construction*, 5. Edition, ISBN:9780130489173, Prentice Hall, Upper Saddle Ri, 150.
- [5] **Sonuç T** (1983) *Karayolu Tekniği*, 2. Baskı, cilt 2, Birsen Yayınları, İstanbul, 341, 345, 346, 358, 363, 371.
- [6] **Çağlar B** (1986) *Yol Yapım Tekniği*, yayın no:259, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 46, 197, 198, 202-214, 220.
- [7] **Kumbasar V** (1970) *Yol Mühendisliği İçin Zemin Mekaniği*, Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul, 217-219, 274, 280.
- [8] **Keçetepen, H** (2007) Dolguların Sıkıştırılmasında Zemin Cins ve Özelliklerine Uygun Sıkıştırıcının Seçimi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 98s.
- [9] **Aytekin M** (2004) *DeneySEL Zemin Mekaniği*, 2. Baskı, ISBN:9781111124571, Teknik Yayınevi, Ankara, 1, 191-192.
- [10] **Faure A G and Mata D A** (1994) Penetration Resistance Value Along Compaction Curves. *Journal of Geotech. Eng.* ASCE 07939410, 120(1): 46.
- [11] **Özaydın K** (1995) *Zemin Mekaniği*, ISBN:975-511-145-X Birsen Yayın Evi, İstanbul 261s.
- [12] **Ersoy S** (1966) *Yapı Makineleri*, cilt 2, İ.T.Ü, İstanbul, 232s.
- [13] **Pierre H** (1982) *An Outline Of Soil And Rock Mechanics*, 2. French Edition, ISBN:9780521287049, Cambridge University, U.S.A., 50.
- [14] **Tunç, A.** (2001) *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*, Atlas Yayın Evi, İstanbul, 840s.
- [15] **Spigolon S J** (2001) *The McGraw-Hill Civil Engineering PE Exam Depth Guide*, 1st edition, ISBN:9780071361842, McGraw-Hill, New York, U.S.A., 6.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [16] **Holtz R D** (2002) *Geoteknik Mühendisliğine Giriş*, ISBN:9789758640324, Gazi Kitabevi, Ankara, 102-112.
- [17] **Ertan Y and Ülkü S** (1978) *Zemin Özellikleri ve Deneyleri*, D.S.İ. Genel Müdürlüğü, Ankara, 147-149.
- [18] **Casagrande A** (1958) Notes on The Design Of The Liquid Limit Device. ISSN:0016-8505, *Geotechnique*, 8(2): 84.
- [19] **Wasti Y** (1987) Likit ve Plastik Limitlerin Koni Penetrasyon Deneyi ile Tayini, *ZMTM 2, Ulusual Kongresi*, Ankara, 1(83).
- [20] **Draper N R and Smith H** (1966) *Applied Regression Analysis*, John Wiley and Sons, Inc., 3. Edit., Chapter 6, ISBN:9780471221708, New York, U.S.A., 407pp.
- [21] **Kalıpsız A** (1981) *İstatistik Yöntemler*, İstanbul Üniversitesi, Orman Fakültesi, Yayın No:2837/294, İstanbul, 558.
- [22] **Ölmez A** (2007) Regresyon Yaklaşımlarla Kompaksiyon Parametrelerinin Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Niğde, 116s.
- [23] **Azzuoz A S and Krizek R J** (1976) Regression Analysis Of Soil Compressibility. *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, 16(2): 19-29.
- [24] **Türkbal A** (1981) *Bilimsel Araştırma Metodları ve Uygulamalı İstatistik*, Erzurum, 158,164.
- [25] **Yılmaz İ** (2006) *Verilen Çözümlemesi-İlişki-Korelasyon*. Ankara Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Eğitim Yönetimi Teftiş- Planlaması ve Ekonomisi Anabilim Dalı, Bilimsel Araştırma Yöntemleri Dersi, Ankara, 8s.
- [26] **Ünal I** (1996) *Eğitim ve Yerleştirme Ekonomisi*, Epar Yayınları, Ankara, 171-172.
- [27] **Okur S** (2009) Parametrik ve Parametrik Olmayan Doğrusal Regresyon Analiz Yöntemlerinin Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zootekni Anabilim Dalı, Adana , 53s.
- [28] **Bekiroğlu N, Konyahoğlu R and Karahan D** (2013) Evaluating Replicability Of Multiple Linear Regression Results Using The Jackknife Technique, *Marmara Medical Journal*, İstanbul, 26(2): 63-67.
- [29] **Beyazıt M** (1996) *İnşaat Mühendisliğinde Olasılık Yöntemleri*, ISBN:9789755610719 İstanbul Teknik Üniversitesi Rektörlüğü Yayınları, Sayı:1573 İstanbul, 237s.
- [30] **Gazeloğlu C** (2013) A Simulation Study On Nonlinear Regression Analysis, *İnternational Anatolia Academic Science Journal*, 1(1): 13-18.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [31] **Soycan T Y** (2008) Yapay Sinir Ağları Yaklaşımı ile Kompaksiyon Parametrelerinin Tahmini, *Yüksek Lisans Tezi*, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Niğde, 140s.
- [32] **Saran O** (2018) Van Gölü Çevresindeki İnce Daneli Zeminlerin Kompaksiyon Parametrelerinin ve Ön Konsolidasyon Basınçlarının SP ve MP Yöntemleri ile İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Van, 189s.
- [33] **Satı Y** (2016) Sıkıştırılmış İnce Daneli Zeminlerin Kayma Mukavemetinin Drenajlı Koşullarda İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 131s.
- [34] **Yüce E** (2012) İnce Taneli Zeminlerde Minyatür Statik Kompaksiyon Deneyi, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 130s.
- [35] **Jeng Y S and Strohm W E** (1976) Prediction Of The Sherar Strenght and Compaction Characteristics Of Compacted Fine-Grained Cohesive Soils, *Final Report*, U.S. Army Engineer Waterways Experiement Station, Soils and Pavement Laboratory, Vicksburg, U.S.A, 35-42.
- [36] **Blotz L R, Benson C H and Boutwell G P** (1998) Estimating optimum water content and maximum dry unit weight for compacted clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*, ASCE 124(9): 907-912.
- [37] **Gürtuğ Y and Sridharan A** (2002) Prediction of Compaction Characteristics of Fine Grained Soils. ISSN:0016-8505, *Geotechnique*, 52(10): 761-763.
- [38] **Gürtuğ Y and Sridharan** (2004) A Compaction Behaviour and Prediction of Its Characteristics of Fine Grained Soils with Particular References to Compaction Energy. *Soils and Foundations*, 44(5): 27-36.
- [39] **Pandian N S, Nagaraj T S and Manoj M** (1997) Re-Examination of Compaction Characteristics of Fine-Grained Soils. *Geotechnique*, 47(2): 363-366.
- [40] **Nagaraj T S, Lutenegeger A J, Pandian N S and Manoj M** (2006) Rapid Estimation of Compaction Parameters fo Field Control. *Geotechnical Testing Journal*. 29(6): 497-506.
- [41] **Horpibulsuk S, Katkan W and Apichatvullop A** (2008) An Approach For Assessment Of Compaction Curves Of Fine-Grained Soils at Various Energies Using a One Point Test. *Soils and Foundations*, Japenese Geotechnical Society, 48(2): 115-126.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [42] **Horpibulsuk S, Katkan W and Naramitkornburee A** (2009) Modified Ohio's Curves: A Rapid Estimation Of Compaction Curves For Coarse- and Fine-Grained Soils. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM 32(1): 64-75.
- [43] **Sridharan A and Nagaraj H B** (2005) Plastic Limit and Compaction Characteristics of Fine-Grained Soils. *Ground Improvement*, 9(1): 17-22.
- [44] **Işık F** (2012) Estimating Compaction Characteristics of Engineering Fill Materials Based on Soil Index Parameters Using Artificial Neural Networks, *Doktora Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 154s.
- [45] **Wang M C and Huang C C** (1984) Soil Compaction and Permeability Prediction Models. *Environmental Engrg.* ASCE, 110(6): 1063-1083.
- [46] **Nagaraj T S** (1994) Analysis and Prediction Of Compaction Characteristics Of Soils. *Indian Institute of Science*, Bangalore, India, 2: 65-77.
- [47] **Kayadelen C** (2005) Doygun Olmayan İnce Daneli Zeminlerin Koşullarındaki Yanal Basınçlarının İncelenmesi, *Doktor Tezi*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, 156s.
- [48] **URL-1** <<http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/1532>> Ziy. Tarihi:11.03.2019

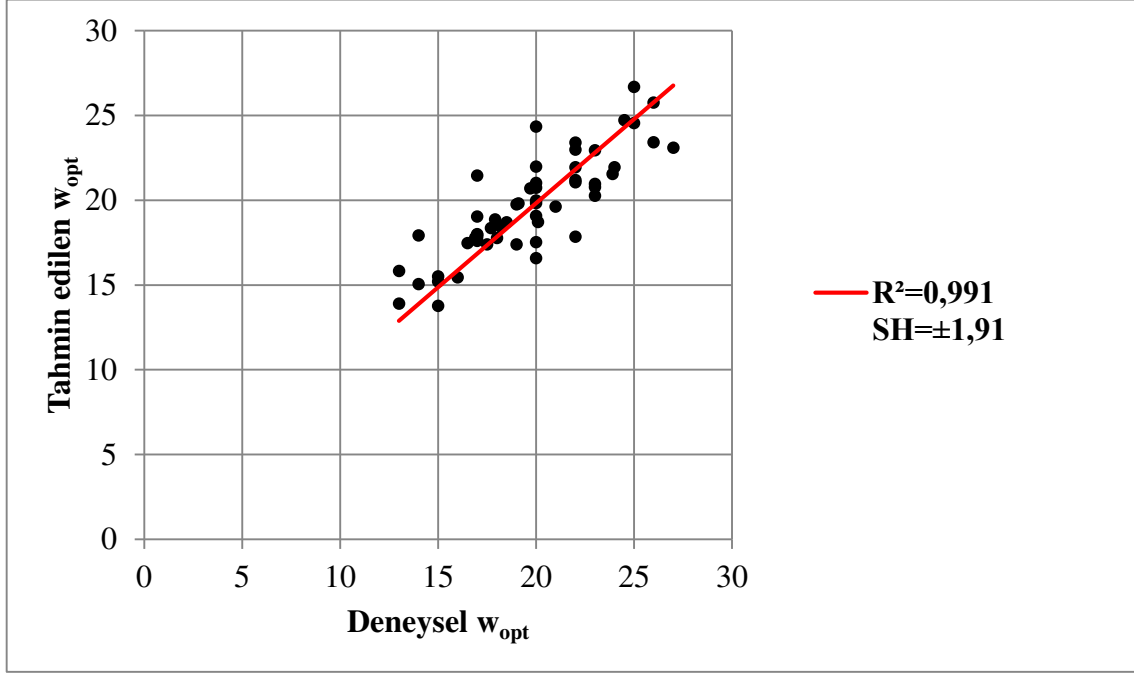
BİBLİYOGRAFYA

- [B1] **Sivrikaya O** (2008) *Models of Compacted Fine-Grained Soils Used as Mineral Liner for Solid Waste*. Environmental Geology, 53(7): 1585-1595.
- [B2] **Sivrikaya O, Togrol E and Kayadelena C** (2008) *Estimating Compaction Behavior Of Fine-Grained Soils Based on Compaction Energy*. Canadian Geotechnical Journal, 45(6): 877-887.
- [B3] **Sivrikaya O** (2007) *Empirical Models of Fine-Grained Soils Compaction*. Engineering Geology.

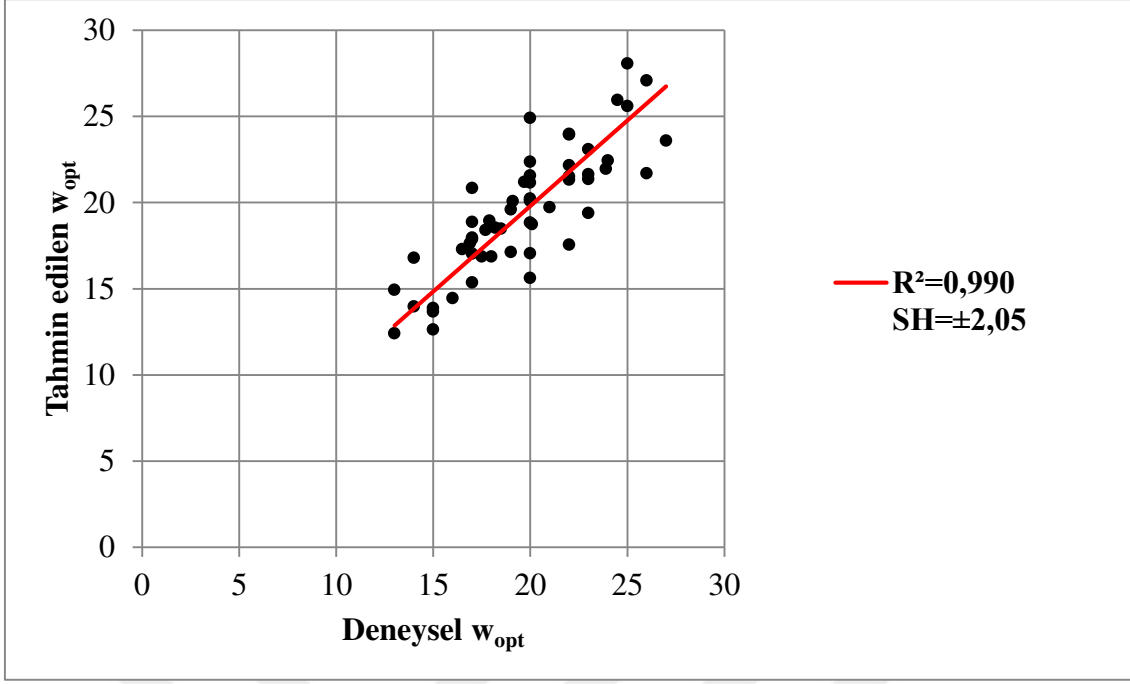


EK AÇIKLAMALAR A

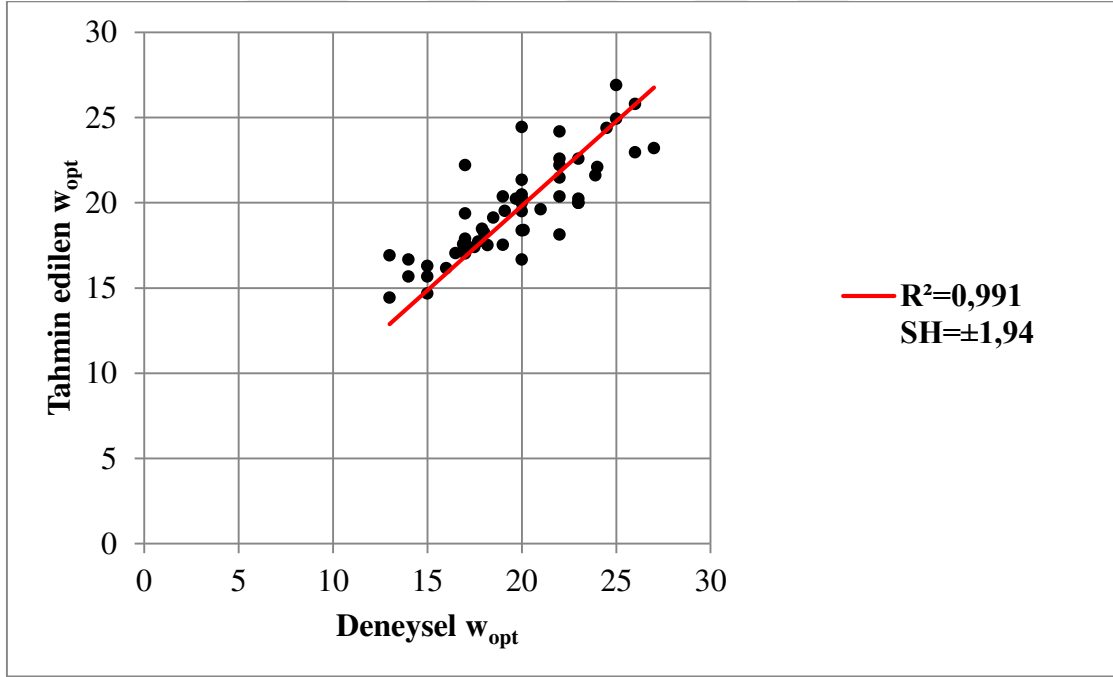
A.1 w_{opt} (S. Proktor) için Grafikler



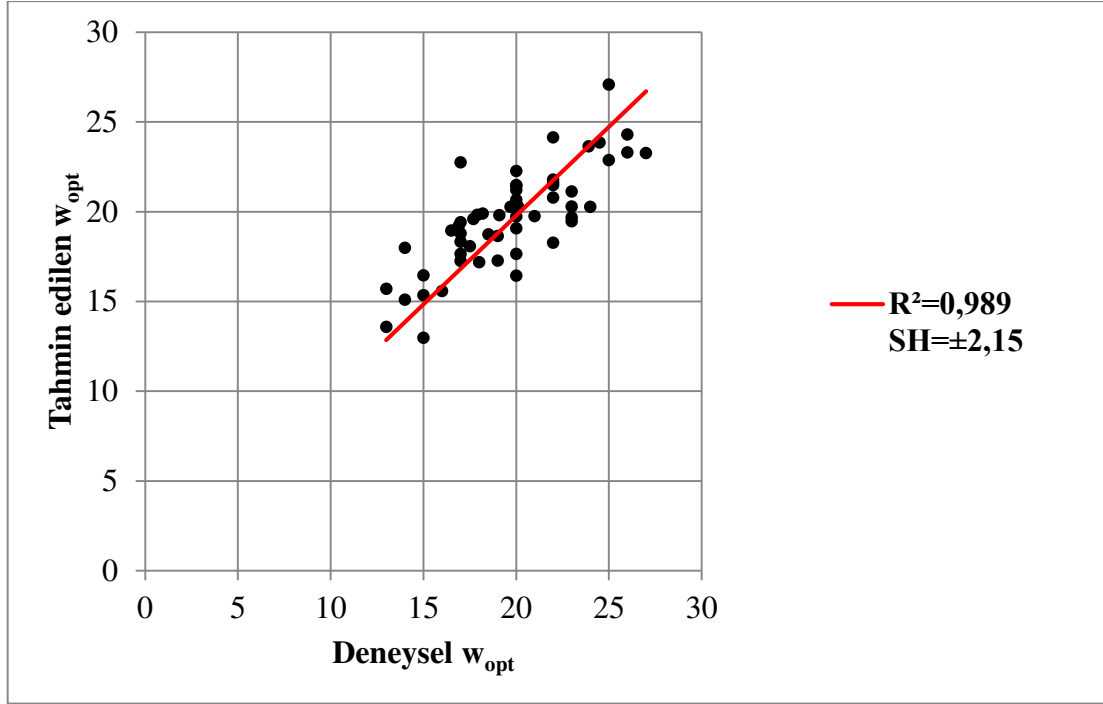
Şekil A.1 Model 2 için deneyisel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.



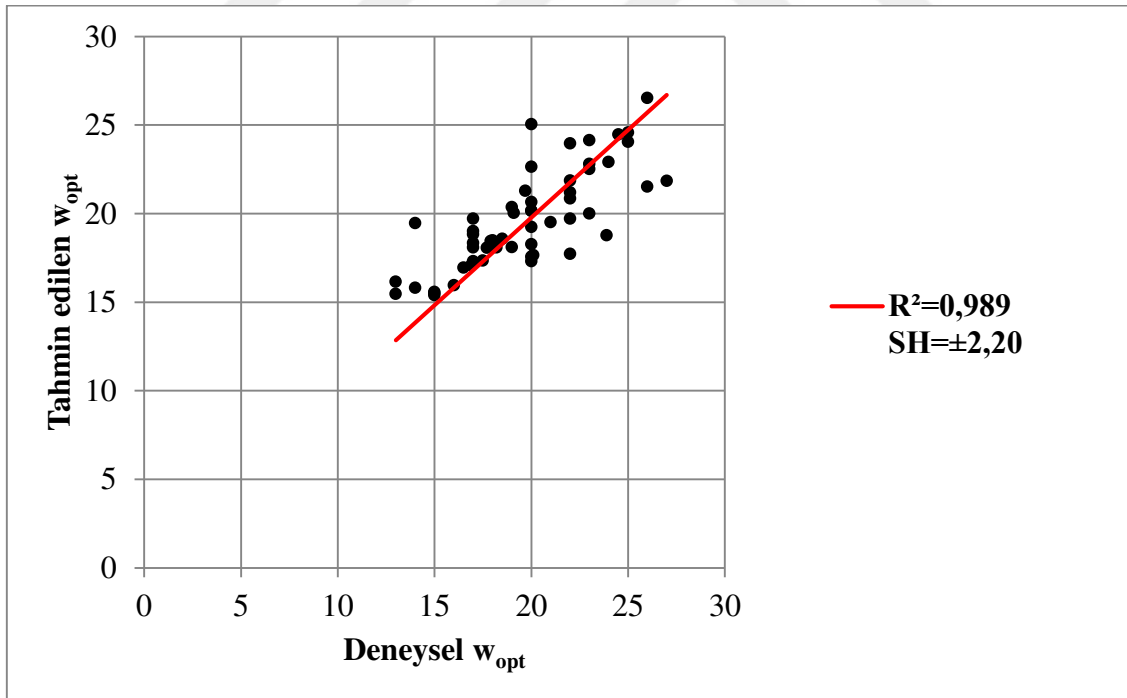
Şekil A.2 Model 3 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.



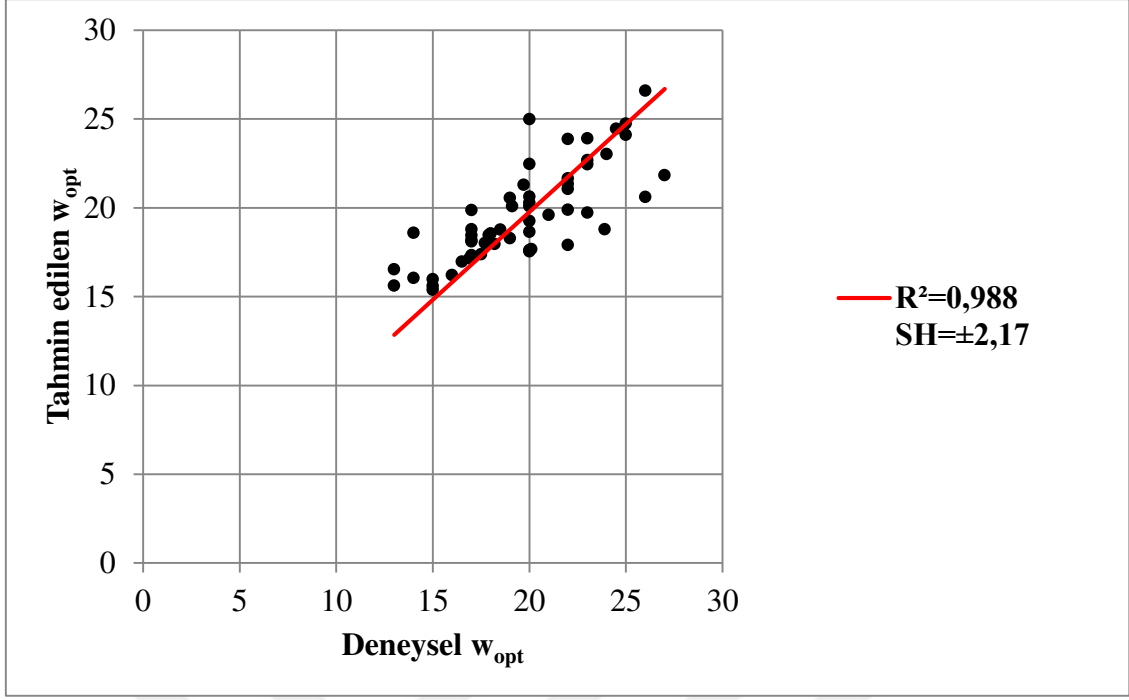
Şekil A.3 Model 5 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.



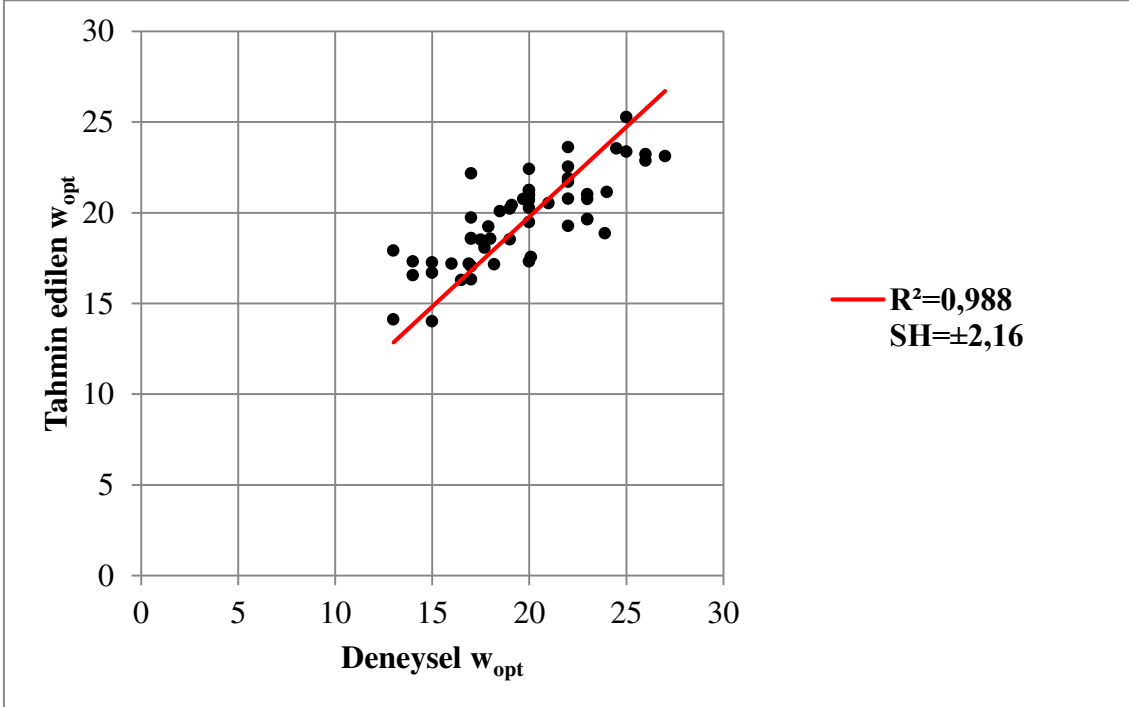
Şekil A.4 Model 6 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.



Şekil A.5 Model 7 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.

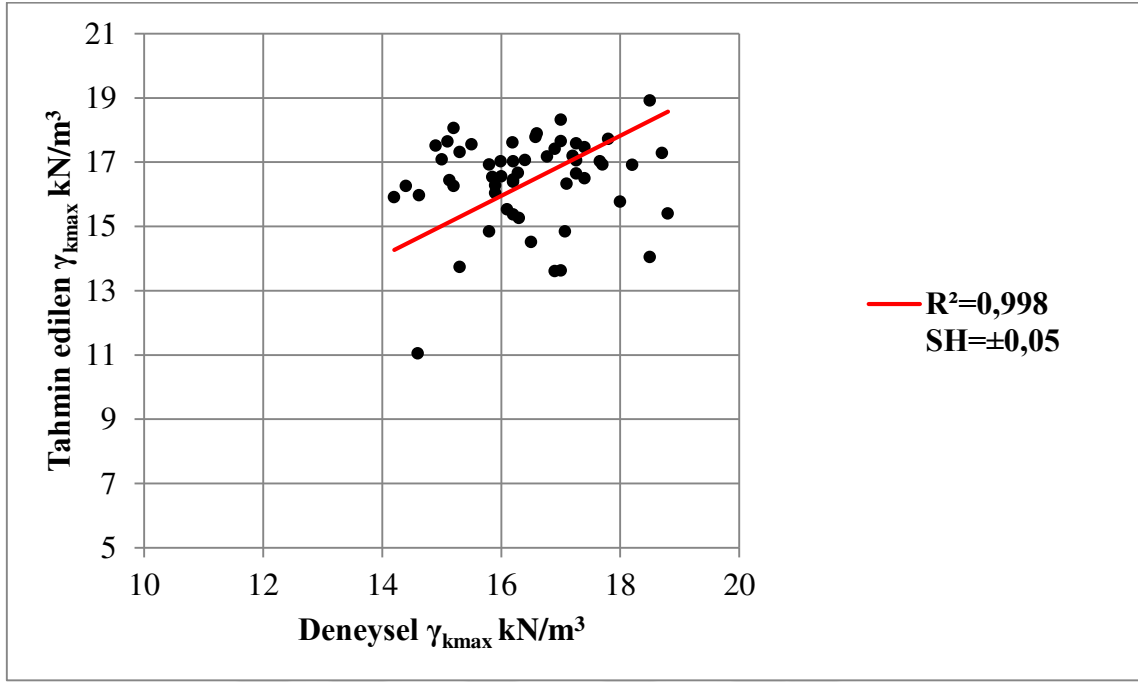


Şekil A.6 Model 8 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.

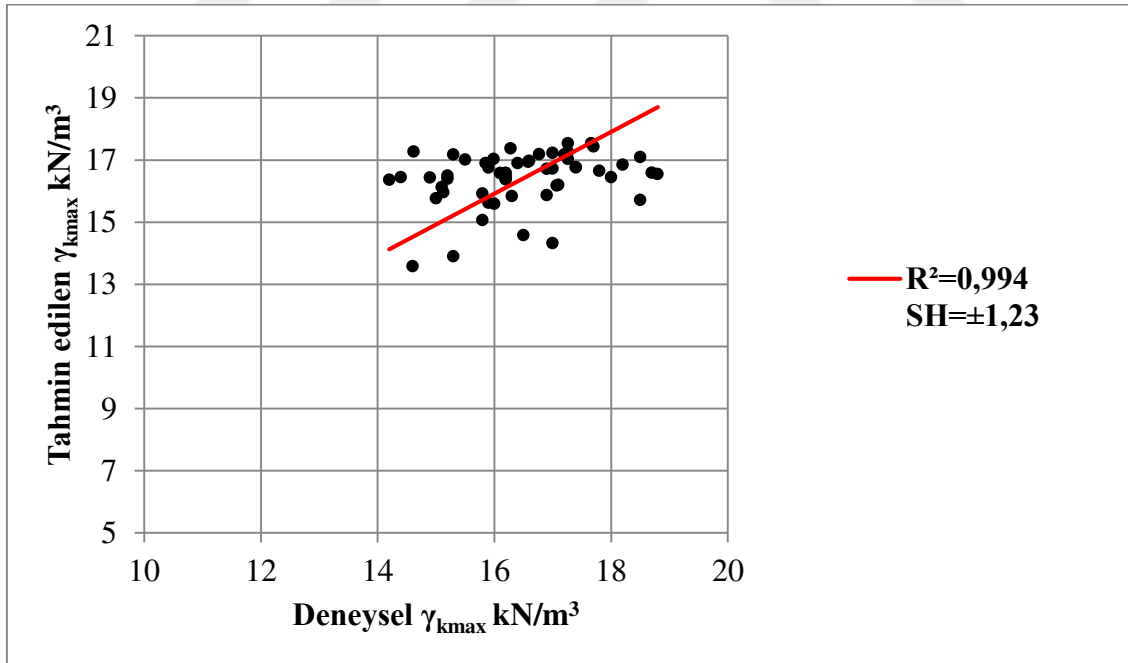


Şekil A.7 Model 10 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.

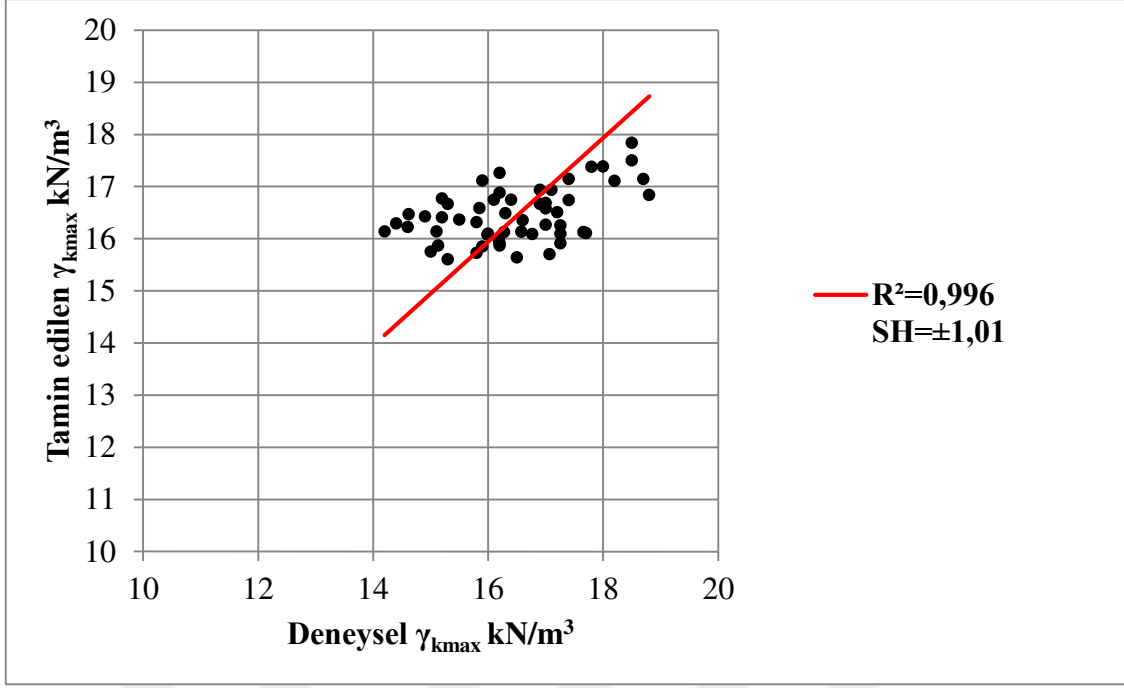
6.2 γ_{kmax} (S. Proktor) için Grafikler



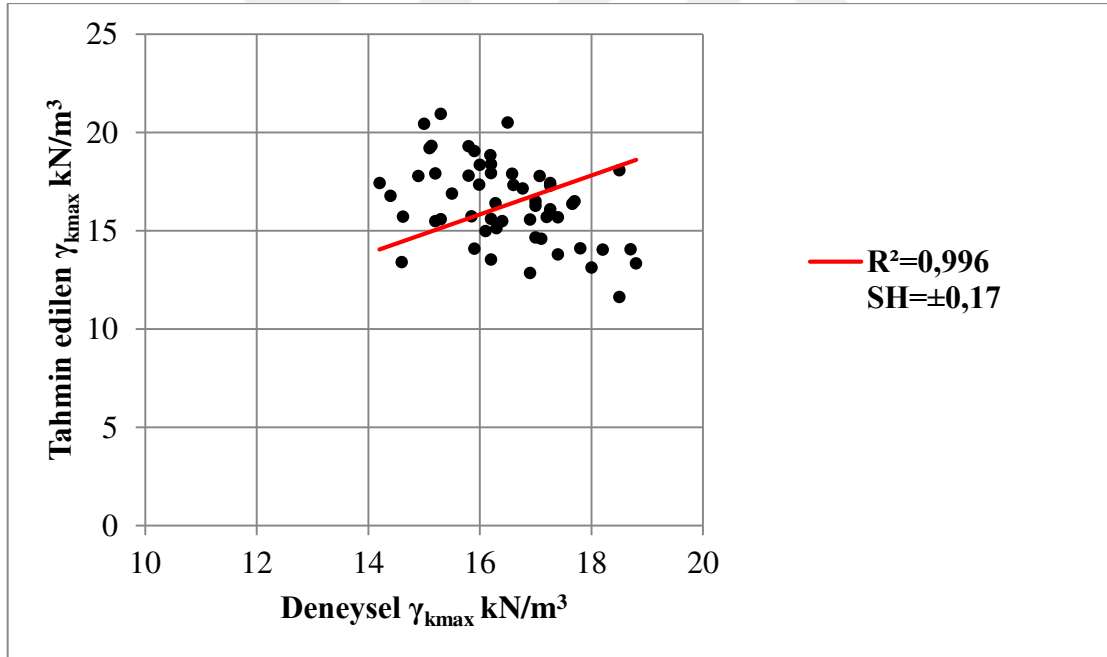
Şekil A.8 Model 4 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.



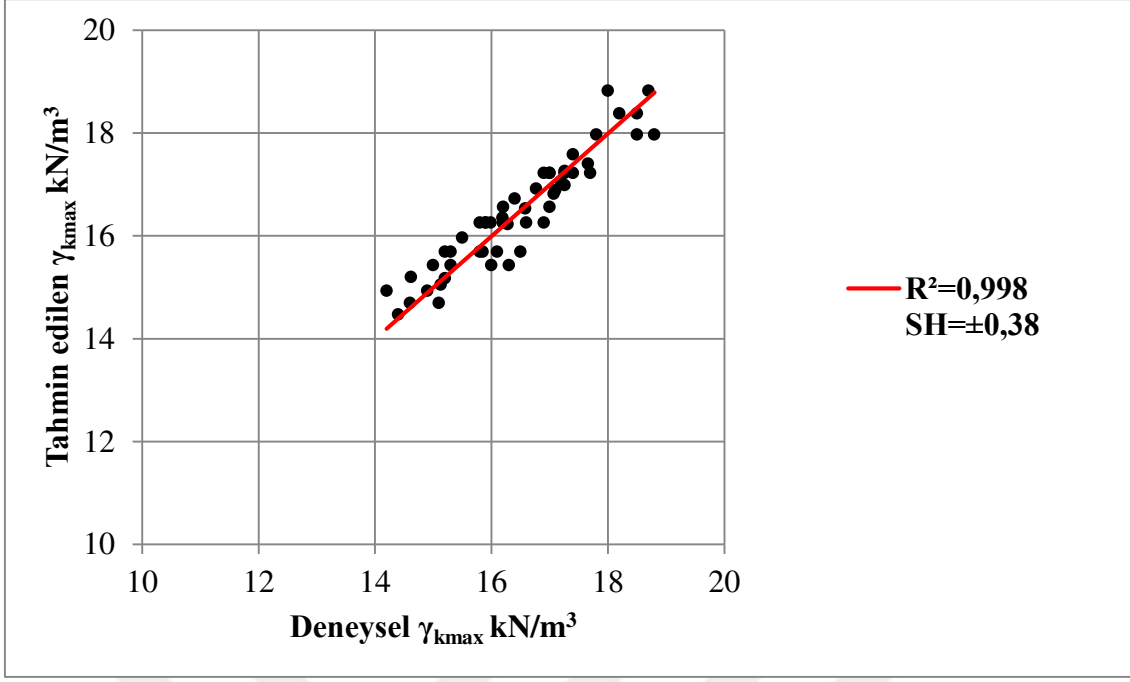
Şekil A.9 Model 5 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.



Şekil A.10 Model 6 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.

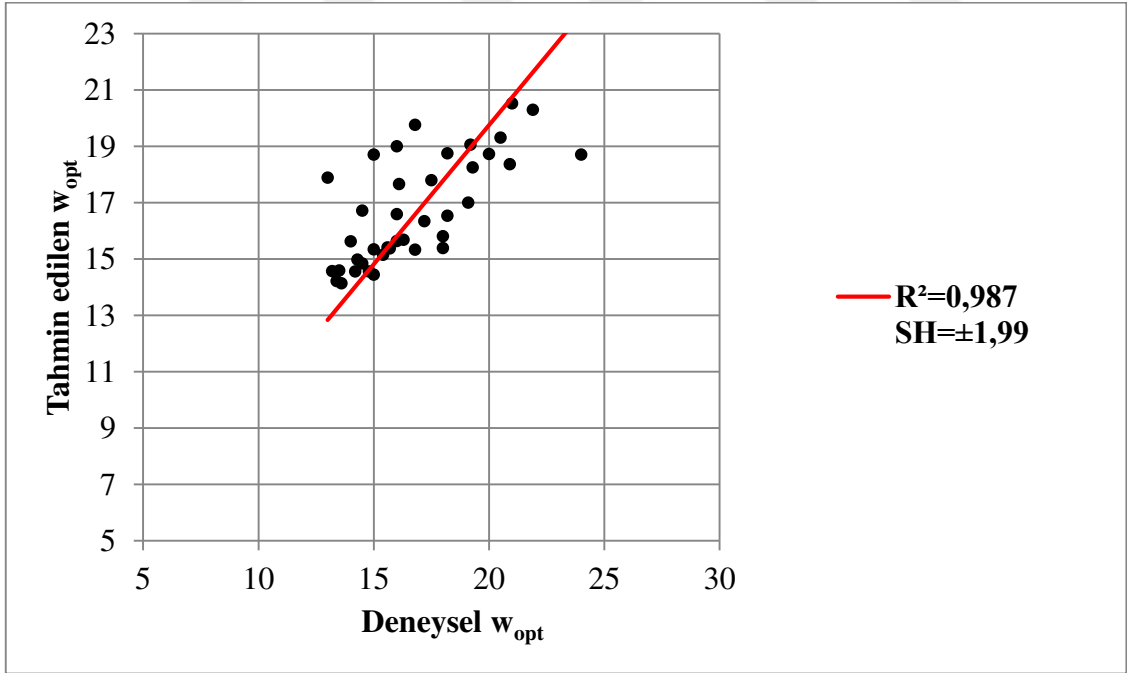


Şekil A.11 Model 7 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.

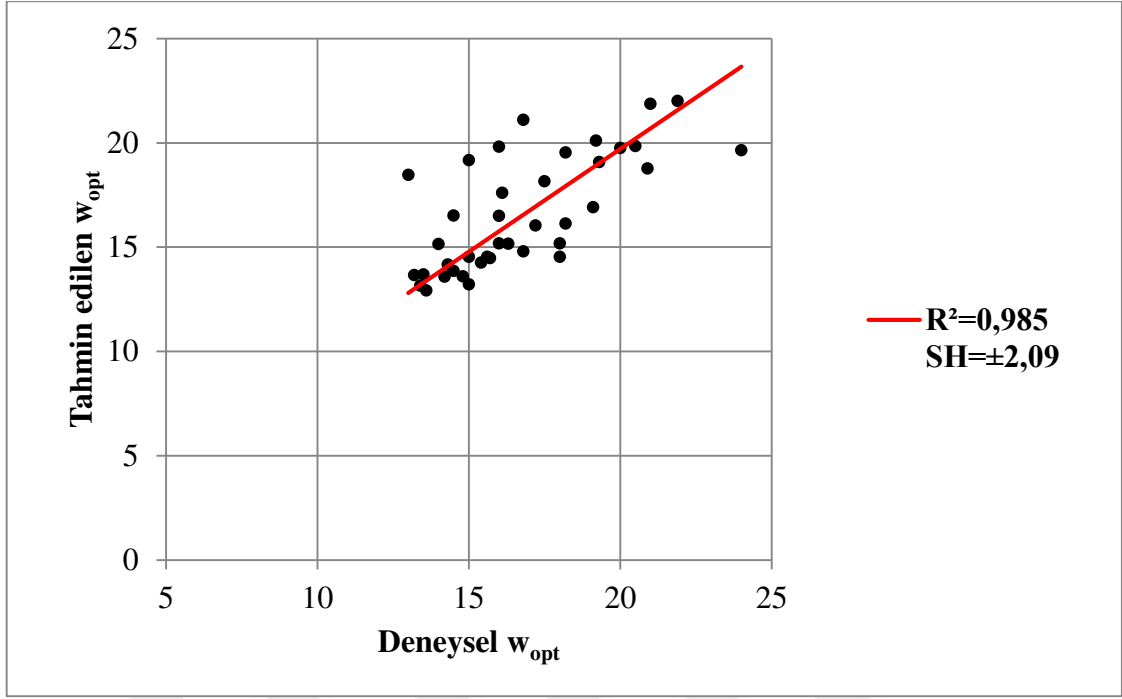


Şekil A.12 Model 8 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.

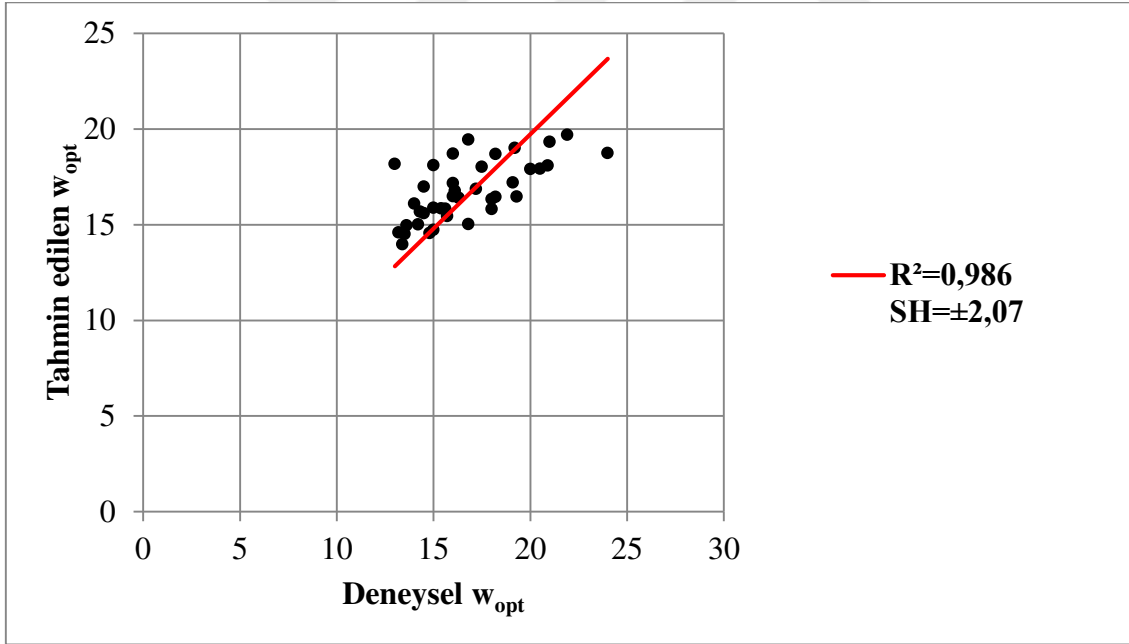
6.3 w_{opt} (M. Proktor) için Grafikler



Şekil A.13 Model 2 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.

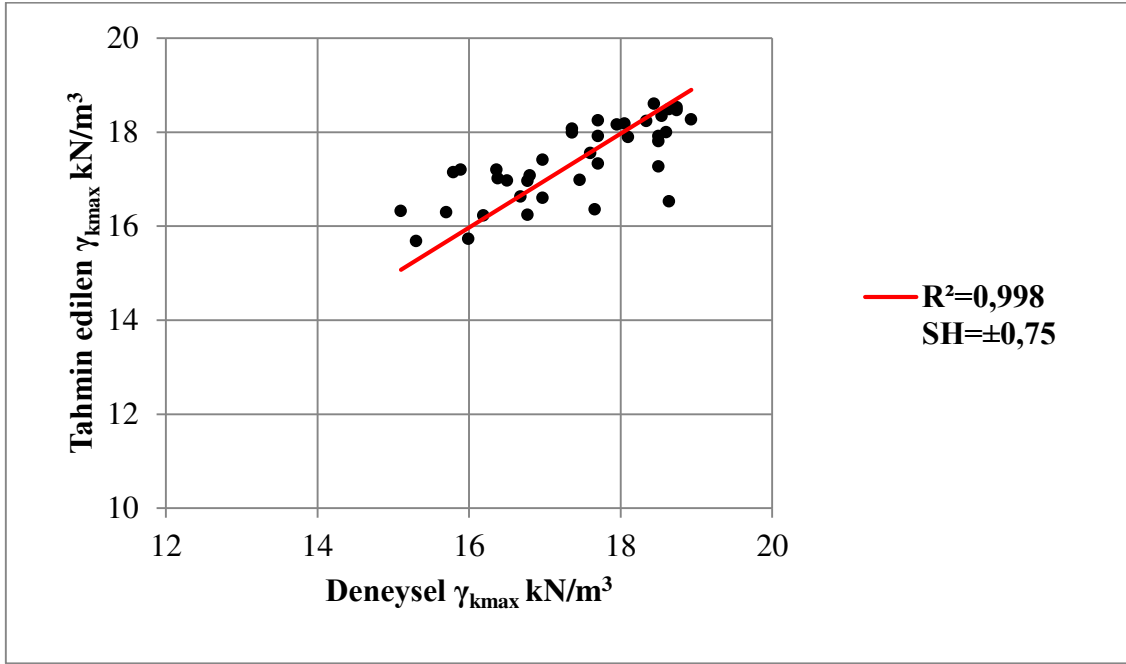


Şekil A.14 Model 3 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.

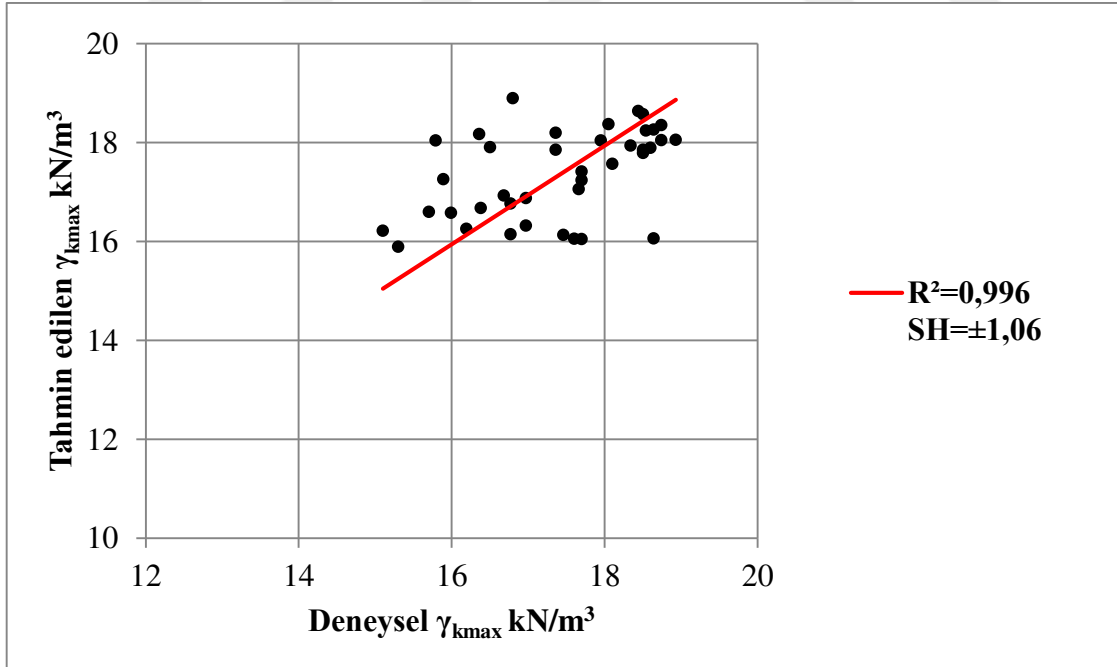


Şekil A.15 Model 4 için deneysel w_{opt} ile tahmin edilen w_{opt} 'un grafiksel karşılaştırılması.

6.4 γ_{kmax} (M. Proktor) için Grafikler



Şekil A.16 Model 7 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.



Şekil A.17 Model 8 için deneysel γ_{kmax} ile tahmin edilen γ_{kmax} 'ın grafiksel karşılaştırılması.



ÖZGEÇMİŞ

Resül SİVRİ, 1989 yılında Zonguldak'da doğdu. İlköğretimi Ayvatlar İlköğretim Okulu'nda, liseyi Kozlu Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi'nde okudu. 2008 yılında Bozok Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde öğretim hayatına başladı. 2012 yılında Üniversiteden birincilikle mezun oldu ve aynı yıl Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans'a başladı. 2012-2013 yıllarında özel sektörde Şantiye Şefi, 2014-2018 yıllarında Türkiye Taş Kömürü Kurumu'nda İnşaat Mühendisi, 2018 yılından itibaren yine Türkiye Taş Kömürü Kurumu İnşaat Emlak Daire Başkanlığı'nda Kontrol Başmühendisliği görevini, ifa etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres: Güney Mah. Barış Cad. Safir Evleri A Blok No:2 Kat:8 D:22 Kozlu/ZONGULDAK

Tel: 05077930340

E-posta: resulsivri6728@gmail.com